

**MODELACIÓN COMPUTACIONAL Y VALIDACIÓN EN CAMPO DE LOS
COEFICIENTES DE REACCION DEL CLORO EN UN SISTEMA DE
ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE: CASO DE ESTUDIO LIBANO
TOLIMA.**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

NANCY YURANI RIVEROS GAVIRIA

CÓDIGO: 505711

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACION
BOGOTÁ; OCTUBRE DE 2018**

**MODELACIÓN COMPUTACIONAL Y VALIDACIÓN EN CAMPO DE LOS
COEFICIENTES DE REACCION DEL CLORO EN UN SISTEMA DE
ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE: CASO DE ESTUDIO LIBANO
TOLIMA.**



NANCY YURANI RIVEROS GAVIRIA
Trabajo de grado para optar el título de ingeniero civil

DOCENTE ASESOR:
ING. FELIPE SANTAMARIA ALZATE

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACION
BOGOTÁ; OCTUBRE DE 2018



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Bogotá D.C, octubre, 2018

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	13
1. GENERALIDADES	15
1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	15
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	16
1.2.1 Planteamiento del Problema	16
1.2.2 Formulación del Problema.....	17
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.2 Objetivo General.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
1.4 JUSTIFICACION.....	18
1.5 LIMITACIONES.....	19
1.5.1 Espacio.....	19
1.5.2 Tiempo	19
1.5.3 Contenido.....	19
1.5.4 Alcance	19
1.6 MARCO DE REFERENCIA	20
1.6.1. Marco Teórico.....	20
1.6.2 Marco Conceptual.....	28
1.6.3 Marco Legal.....	30
1.7 METODOLOGIA	30
1.7.1 FASE 1	31
1.7.1.1 Estado actual de la RDAP	31

1.7.1.2 Problemática presente.....	32
1.7.1.3 Información en campo	33
1.7.2 FASE 2	38
1.7.2.1 Información previa	38
1.7.2.2 Modelación de la red.....	42
1.7.2.3 Calibración de la red	44
1.7.2.4 Calibración del cloro.....	47
1.7.3 FASE 3	51
2. ANALISIS COMPARATIVOS Y RESULTADOS	52
3. CONCLUSIONES	58
4. RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Rugosidad absoluta.....	21
Figura 2. Curva de Demanda del Cloro	23
Figura 3. Representación gráfica de la Ley de Chick	25
Figura 4. Valores Coeficiente Kb.....	26
Figura 5. Valores Coeficiente Kw.....	27
Figura 6. Marco conceptual del proyecto.....	28
Figura 7. Tipos de reacción del cloro en el agua.....	29
Figura 8. Formas importantes del cloro en la cloración del agua	29
Figura 9. Resumen de la metodología desarrollada	30
Figura 10. Localización del Líbano en el Tolima	31
Figura 11. Plano Red de distribución de agua potable del Líbano.....	31
Figura 12. Localización barrio Isidro Parra	33
Figura 13. Toma de presiones en campo.....	34
Figura 14. Manómetro Bourdon conectado a los medidores de agua	35
Figura 15. Localización puntos de muestreo	36
Figura 16. Ubicación puntos de muestra cloro.....	37
Figura 17. Análisis de la muestra del cloro en el Colorímetro digital	38
Figura 18. Imagen satelital Barrio Isidro Parra.....	39
Figura 19. Pendientes en Global Mapper.....	40
Figura 20. Áreas aferentes a los nodos.....	40
Figura 21. Modelación de la red en Epanet.....	43
Figura 22. Diámetro de tuberías	43
Figura 23. Rugosidad de las tuberías	44

Figura 24. Calibración de presiones.....	45
Figura 25. Comparación red Modelada y red calibrada.....	46
Figura 26. Comparación valores de presión.....	47
Figura 27. Parámetros de calidad del cloro.....	48
Figura 28. Comparación Cloro.....	49
Figura 29. Contorno niveles de Cloro.....	49
Figura 30. Nodos con bajo nivel de Cloro	50
Figura 31. Red de cloro calibrada.	51
Figura 32. Balance de caudales.....	52
Figura 33. Comportamiento del cloro en la tubería	52
Figura 34 Simulación del cloro con Kw y Kb en -0.5	56
Figura 35 Simulación del cloro con Kw y Kb en -1.2	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Puntos de muestreo	36
Tabla 2 Demanda base por nodo	41
Tabla 3. Curva modelación de la demanda	45
Tabla 4. Informe de calibración de las presiones Epanet.....	47
Tabla 5 Comparación datos con rugosidades diferentes	53

LISTA DE ANEXOS

Anexo a. Tabla comportamiento de la red – presión y cloro	62
Anexo b. Tablas de corrección del cloro en los nodos 27, 28 y 52.....	63

DEDICATORIA

A mi esposo Jorge, por la motivación, apoyo y colaboración durante todo el proceso de formación académica. A mi hijo Jorge Luis, que soporto con paciencia mi ausencia en casa. A todos los familiares, amigos y profesores que de una u otra manera colaboraron a que este sueño se hiciera realidad.

Nancy Yurani Riveros

GLOSARIO

ACUEDUCTO: Conducto para transportar agua, generalmente en grandes cantidades para abastecer a una población.

AGUA POTABLE: agua que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos es apta y aceptable para el consumo humano y cumple con las normas de calidad de agua.

CALIBRACIÓN: es un modelo que se lleva a la realidad, este proceso se basa en el caudal y la presión, el caudal se basa en la masa que hace referencia al consumo, agua no potabilizada y pérdidas de agua, la presión se basa en la energía referida a las pérdidas por accesorios, diámetros y rugosidad de la tubería (Saldarriaga 2007).

CLORO: compuesto desinfectante que se presenta de forma líquida, sólida o gaseosa, para el tratamiento de agua con fines de potabilización.

CLORO RESIDUAL: Cantidad de cloro libre o combinado que permanece activo tras un tiempo de contacto determinado.

RDAP: Red de distribución de agua potable

INTRODUCCION

Generalmente en el proceso de potabilización del agua se emplean desinfectantes para eliminar agentes patógenos especialmente bacterias, esto con el fin de garantizar óptimas condiciones para el consumo humano, por ello en este trabajo de investigación se considera determinar el coeficiente de reacción del cloro en la red de distribución de agua potable del municipio del Líbano Tolima, para conocer de manera teórica la cantidad acertada de dicho desinfectante (cloro) en la planta de tratamiento y/o almacenamiento.

“El cloro residual libre decae dentro de la red y en los tanques debido a que reacciona con el agua, y con la pared de tuberías y tanques. Para prevenir enfermedades transmisibles por el agua se requiere mantener cierto nivel de desinfección en todo el sistema de distribución”¹

Por lo general en Colombia y a nivel mundial el desinfectante en la potabilización del agua más usado es el cloro, debido a su alto poder de oxidación que genera la destrucción de bacterias que se encuentren presentes en el líquido evitando los malos olores, es económico, confiable y fácil de utilizar, de acuerdo a la Norma Técnica Colombia NTC-813 El agua potable deberá tener mínimo 0,2 mg/l y un máximo de 1,0 mg/l de cloro residual libre en la red, expresado como cloro (Cl₂) y el cloro total deberá tener como máximo una concentración de 1,2 mg/l.

En la planta de tratamiento del municipio del Líbano, en su fase de desinfección se asegura la disminución de gérmenes patógenos hasta una concentración inocua, en contraste con la esterilización en el cual se efectúa una destrucción total de la población bacteriana. Para almacenamiento y transporte se utilizan cilindros de 68 kilos y para su dosificación un clorador marca Sonix 100, este equipo de cloración está compuesto por un clorador que permite medir con exactitud el flujo de cloro gaseoso que sale del cilindro, un inyector donde se produce la mezcla de cloro gaseoso en una corriente de agua con la cual se forma una solución y un difusor a través del cual se dispersa en forma rápida y uniforme la solución de cloro en el agua que se está desinfectando.

¹ TZATCHKOV, Velitchko., ALCOCER Y, Víctor. ARREGUIN C, Felipe Ignacio. Decaimiento del cloro por reacción con el agua en redes de distribución. En: Ingeniería hidráulica en México. Enero-marzo 2004, vol.19. pp.41

La empresa de servicios públicos del municipio del Líbano EMSER ESP, proporciona la información de la operatividad en la planta, en cuanto a suministro de químicos, consumos, caudales y el catastro de redes, como primera medida para poder desarrollar el trabajo investigativo y así determinar los coeficientes de reacción del cloro libre en la red, por medio de la calibración y la modelación de la red en el software EPANET, estos coeficientes servirán al municipio para optimizar y garantizar que la dosificación del cloro en el proceso de potabilización del agua cumpla con los parámetros establecidos e idóneos para el consumo humano.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

El agua es uno de los recursos vitales para el ser humano, por ello es importante que esta cuente con un proceso de desinfección que garantice que se pueda consumir. Un mal proceso de potabilización puede generar que en el agua se encuentren sustancias nocivas para el ser humano ocasionando diversos síntomas y enfermedades. Es fundamental que en las redes de distribución se encuentren concentraciones de cloro residual durante todo su proceso, es decir, desde la fase de desinfección en la planta de tratamiento hasta las acometidas de los consumidores, todo esto como medida de certificar que el agua está correctamente desinfectada. Mas sin embargo en muchas ocasiones la red puede presentar un decaimiento del cloro residual y el agua se puede encontrar en buenas condiciones, sin presencia de contaminación microbiológica, aunque esto no es lo apropiado.

Desde el año de 1988 la empresa de servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo del municipio del Líbano, EMSER ESP, cuenta con su planta de tratamiento la cual en la actualidad brinda el servicio en el área urbana a cerca de 25.192 habitantes (Según Censo del DANE proyección 2005-2020). El suministro de agua potable a la población es considerado conforme al acuerdo que rige el decreto 475 de 1998 “Normas técnicas de calidad del agua potable”. A diario en el manejo operacional se busca mantener y mejorar la calidad del agua, este trabajo investigativo aporta al municipio una base teórica para mejorar y facilitar la dosificación del cloro durante su desinfección en la planta de tratamiento.

La red de acueducto actual del municipio es en su mayoría (90%) de material de asbesto cemento, considerando que la tubería lleva en uso alrededor de unos 40 años donde ha venido trabajando de manera constante, surge la preocupación por saber si el agua suministrada a la población si cuenta con las condiciones de calidad, la empresa de acueducto a diario atiende llamados sobre daños o fugas en la red, esto se presenta por presiones altas en algún tramo de la tubería. Según fuentes de personal de la empresa, la tubería tiene un desgaste considerable del recubrimiento en su parte interna, lo que la hace más vulnerable a que el agua final puede contaminarse o reducir la cantidad de cloro residual.

Es muy importante garantizar que el cloro no disminuya durante su recorrido, la labor de garantizar un nivel de desinfección orgánico adecuado en cada punto del sistema de distribución de agua potable puede facilitarse con el uso de un modelo de simulación de la calidad del agua. El modelo se alimenta con los datos físicos y operacionales

(hidráulicos) del sistema de distribución, y proporciona la concentración del desinfectante en cada punto, lo que favorece la identificación de las partes potencialmente problemáticas de la red, y permite definir estrategias para garantizar una desinfección eficiente en todo el sistema. Autores, TZATCHKOV, Velitchko. ALCOCER Y, Víctor. ARREGUIN C, Felipe Ignacio. Año 2004.

Se conoce el estudio del sistema de transmisión de agua potable que suministra el este de Algarve, Portugal. Donde el contenido promedio de cloro es 0,83 mg / L en la salida y 0,6 mg / L en la entrada del tanque. El agua tiene relativamente baja orgánica (1,5 mg C / L como carbono orgánico total) y el contenido inorgánico (hierro, amoníaco y las concentraciones de manganeso por debajo de los límites de detección) y por tal razón, se espera que la demanda de cloro sea baja.

El modelo hidráulico fue desarrollado por la empresa de agua usando EPANET 2.0. El cloro se modeló para 1st y nth en el orden de cinética de descomposición (con el fin de cloro). La diferencia entre los valores calculados y medidos aumenta con la distancia del punto de medición a la planta (es decir, con el tiempo de viaje). Estas diferencias fueron probablemente debidas a factores que ejercen demanda de cloro, aparte de reacción química entre el cloro y el agua. Esto se atribuye tradicionalmente a reacciones con material de la tubería y la biopelícula en la superficie interna de tuberías, reconocido como decaimiento de la pared.²

Aunque no se reportan casos de enfermedades graves por el consumo del agua en el municipio del Líbano, si es importante saber que comportamientos tiene esta durante su distribución, puede presentar un alto decaimiento en el cloro o no. Un estudio de 15 sistemas de agua en el estado de Illinois (EE.UU.) donde algunas tuberías de asbesto cemento tenían más de 50 años, y donde el agua estaba catalogada como no agresiva o moderadamente agresiva, no hubo diferencias significativas antes y después de haber pasado a través de la red de tuberías de asbesto cemento.³

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

1.2.1 Planteamiento del Problema

En el momento de determinar la calidad de agua, los factores más importantes a evaluar es la presencia de cloro residual y la ausencia de agentes patógenos o microorganismos

² 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013, Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX, Disponible en Internet: <URL: www.sciencedirect.com

³ Hallenbeck WH, Chen EH, Hesse CS, Patel-Mandlik K, et Wolff AH. Journal of American Water Works Association, 1978.

que perjudiquen al ser humano al consumir el agua. Se debe dar cumplimiento al decreto 475 de 1998 donde se establece los parámetros dentro del rango admisible de 0,2mg/l – 1,0mg/l.⁴

Actualmente no se conocen los coeficientes de reacción del cloro con que llega el agua a los consumidores, a su vez se desconocen o no existe registros de presiones de la red, lo que limita la información para desarrollar la modelación y calibración de la red en el software EPANET.

El desconocimiento de las presiones en la red del acueducto genera constantemente daños como roturas en la tubería, EMSER diariamente atiende daños de este tipo, lo que genera cortes del servicio en sectores y cuando se normaliza el servicio el agua llega a los consumidores con turbiedad, lo que da lugar a pensar sobre formación de depósitos en las conducciones del agua y especular sobre la calidad del agua.

1.2.2 Formulación del Problema

La red de distribución del municipio debe garantizar en todos sus puntos de distribución presencia de cloro, y se conoce que según estudios realizados el comportamiento del cloro tiende a disminuir durante su recorrido por la red, por esto se propone la determinación de los coeficientes de reacción de cloro que maneja la red de distribución de agua potable en el municipio del Líbano.

Por falta de información de las presiones de la red, se limita el proyecto y de acuerdo al catastro de redes se evaluaron los puntos idóneos para hacer el estudio del cloro residual libre en la red, donde se optó por realizar la modelación de la red del barrio Isidro Parra, el cual es uno de los barrios más alejados de la planta de tratamiento.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, *¿Cuáles serán los coeficientes de reacción del cloro en las redes de distribución existente en el municipio del Líbano?*

Para tal fin se plantea una propuesta de modelación computacional por medio del programa EPANET.

⁴ DECRETO 475 de 1998 “Normas técnicas de calidad del agua potable”. Bogotá: DIARIO OFICIAL. AÑO CXXXIII. N. 43259. 16 marzo 1998.

1.3 OBJETIVOS

1.3.2 Objetivo General

Determinar los coeficientes de reacción del cloro del sistema de abastecimiento de agua potable del municipio del Líbano Tolima, por medio de una modelación computacional y validación en campo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Medición en campo de la concentración de cloro residual al inicio y ciertos puntos específicos de la red de distribución de agua potable y medición de parámetros hidráulicos como el caudal y presión.
- Calibración hidráulica de la red de distribución, de las constantes de decaimiento de red según las mediciones realizadas en campo.
- Análisis de sensibilidad de la red de distribución para diferentes escenarios en el sistema.

1.4 JUSTIFICACION

El agua es uno de los recursos vitales para el ser humano, por ello es importante que esta cuente con un proceso de desinfección que garantice que se pueda consumir. Un mal proceso de potabilización puede generar que en el agua se encuentren sustancias nocivas para el ser humano ocasionando diversos síntomas y enfermedades. Es fundamental que en las redes de distribución se encuentren concentraciones de cloro residual durante todo su proceso, es decir, desde la fase de desinfección en la planta de tratamiento hasta las acometidas de los consumidores, todo esto como medida de certificar que el agua está correctamente desinfectada. Mas sin embargo en muchas ocasiones la red puede presentar un decaimiento del cloro residual y el agua se puede encontrar en buenas condiciones, sin presencia de contaminación microbiológica, aunque esto no es lo apropiado.

En este caso para conocer los coeficientes de reacción del cloro en la red de distribución del municipio del Líbano se utilizará una modelación computacional en el software EPANET, el cual fue diseñado para ser una herramienta de investigación para mejorar la comprensión del flujo, la degradación (o decaimiento) y la distribución de los componentes del agua potable dentro de los sistemas de distribución. Se puede utilizar para muchos tipos diferentes de aplicaciones en el análisis de los sistemas de

distribución. Diseño de programa de muestreo, la calibración del modelo hidráulico, el análisis de cloro residual y evaluación de la exposición de los consumidores son algunos ejemplos.⁵

1.5 LIMITACIONES

Límites, en cuanto a espacio, tiempo, contenido y alcances para el desarrollo del proyecto, con estas limitaciones se debe cumplir a cabalidad los objetivos planteados.

1.5.1 Espacio

El suministro de información se llevó a cabo en el municipio del Líbano Tolima, en la visita a campo se recolectaron los datos de presiones y la empresa EMSER ESP suministro el catastro de redes del acueducto el cual fue guía para la modelación de la red que se realizó de manera computacional en la ciudad de Bogotá.

1.5.2 Tiempo

La investigación fue realizada durante los meses de agosto, septiembre y octubre del presente año, tiempo limitado por el semestre II del año 2018.

1.5.3 Contenido

Se realiza la propuesta de determinar los coeficientes de reacción del cloro en la red de acueducto del Líbano Tolima, por medio de una modelación computacional, para conocer la calidad con la que el agua es suministrada a la población. Parte de la información fue adquirida gracias la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo del Líbano, quienes amablemente nos facilitaron datos y acompañamiento a campo para toma de la información faltante.

1.5.4 Alcance

Debido a que la empresa no cuenta con información de las presiones a lo largo de la red del acueducto se opta por realizar la modelación solo en el barrio Isidro Parra que es uno de los más alejados de la planta de tratamiento, donde se realizó la toma de datos en campo, modelación y calibración de la red.

⁵ THE ITALIAN ASSOCIATION OF CHEMICAL ENGINEERING, Modeling Chlorine Decay in Drinking Water Distribution Systems using Aquasim, VOL. 57, 2017

1.6 MARCO DE REFERENCIA

1.6.1. Marco Teórico.

En la calibración de redes de distribución se debe tener en cuenta varios parámetros que influyen en el comportamiento hidráulico de la red. Estas variables se deben considerar en la etapa de diseño de la red para garantizar sus condiciones, en este caso la red se encuentra en funcionamiento por lo que considerar el estado de estos parámetros es más complejo, se debe realizar una calibración en los modelos hidráulicos de acuerdo a los datos reales que se tomen en campo, tanto de operación como de mantenimiento. Las variables según su naturaleza pueden clasificarse como hidráulicas o topológicas.⁶

Las variables hidráulicas son las que determinan en gran medida la cantidad de agua que fluye a través de los diferentes elementos que conforman el sistema. Se clasifican a su vez en *Demandas Desconocidas*: Representan la existencia de problemas de tipo comercial al interior del sistema, los cuales pueden estar asociados a conexiones ilegales, des calibración en los micro medidores instalados, errores en las mediciones o la ausencia de la misma (SALDARRIAGA, Juan y JURADO, Cesar Mauricio, 2008). Y en *Emisores*: Dispositivos asociados a los nodos de la red, que permiten modelar el flujo de salida a través de una tubería o en un orificio descargando dicho caudal a la atmósfera. En la modelación hidráulica las fugas se consideran como emisores. El caudal de salida por un emisor varía en función de la presión disponible en el nodo, conforme con la ecuación 1. (SALDARRIAGA, Juan y JURADO, Cesar Mauricio, 2008).

Las Variables topológicas son las conformadas por todos aquellos aspectos físicos del sistema, los cuales determinan principalmente la dirección y velocidad del flujo, así como la distribución de la energía en su interior. Las variables topológicas presentes en un sistema típico de distribución son: Diámetros, Rugosidades y Pérdidas menores. (SALDARRIAGA, Juan y JURADO, Cesar Mauricio, 2008).

Para el caso de la modelación de la red y calibración se debe empezar con el conocimiento de la ecuación para conductos a presión de Darcy- Weisbach.

Ecuación 3. Ecuación de Darcy Weisbach

$$hf = f * L D * v^2 / 2g$$

⁶ SALDARRIAGA, Juan y JURADO, Cesar Mauricio. Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable. Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros, XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, 2008.

Donde:

- f** es el factor de fricción (adimensional).
- D** es el diámetro (m).
- g** es la gravedad (m/s²).
- L** es la longitud (m).
- v** es la velocidad (m/s).

Para utilizar esta ecuación se debe conocer el coeficiente de fricción, ecuación de Hagen-Poiseuille para flujo laminar con el número de Reynolds (Re) inferior a 2000:

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu}$$

$$f = \frac{64}{Re}$$

Donde:

- p** es la densidad del fluido (kg/m³).
- v** es la velocidad (m/s).
- D** es el diámetro (m).
- m** es la densidad dinámica (kg/m³).

Rugosidad absoluta para materiales utilizados en la conducción de fluidos

Figura 1. Rugosidad absoluta

Rugosidad absoluta	
Material	K_s (mm)
Vidrio	0.0003
PVC, CPVC	0.0015
Asbesto cemento	0.03
GRP	0.03
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
CCP	0.12
Hierro fundido asfaltado	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Arcilla vitrificada	0.15
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Madera cepillada	0,18 a 0,90
Concreto	0,30 a 3,00
Acero bridado	0,90 a 9,00

Fuente: (De Plaza, 2017)

Para el caso de este proyecto se tendrá como base la **MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA** la cual es una extensión directa de la Modelación de la Red.

Se usa fundamentalmente para estudiar los siguientes procesos físicos y químicos: el transporte, la mezcla y el incremento o decaimiento de la concentración de sustancias químicas que transporta el agua.

COMPUESTOS CLORADOS QUE TIENEN PROPIEDADES DESINFECTANTES

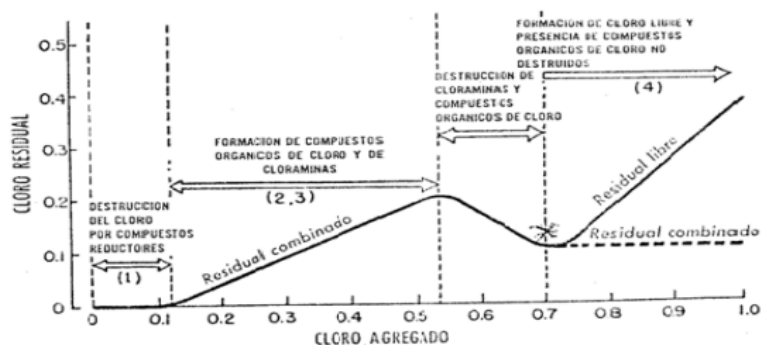
- El cloro (Cl_2) en forma líquida, envasado en cilindros a presión.
- Hipoclorito de sodio (NaClO) con un contenido de cloro activo de 10% a 15%.
- Hipoclorito de calcio [$\text{Ca}(\text{OCl})_2$], también conocido como HTH (high test hypochlorite) con 70% de cloro disponible.
- Dióxido de cloro (ClO_2) producido en la misma planta de tratamiento de acuerdo con la siguiente reacción:
$$5 \text{NaClO}_2 + 4 \text{HCl} = 4 \text{ClO}_2 + 5 \text{NaCl} + 2 \text{H}_2\text{O}$$
- Monocloramina (NH_2Cl), formada por la adición de cloro y amonio al agua que va a ser desinfectada.

REACCIONES DEL CLORO EN EL AGUA

Se considera demanda de Cloro a la cantidad que se agrega, menos la cantidad que hay después del periodo de reacción. La cantidad de cloro que permanece después del periodo de reacción se define como cloro residual y se expresa en miligramos por litro (mg/L) o en partes por millón (ppm). El cloro residual puede existir como compuestos clorados de materia orgánica y amoníaco, en cuyo caso se conoce como “cloro residual combinado”; o puede estar al mismo tiempo combinado y como “cloro residual libre” y en este caso se conoce como “cloro residual total”.⁷

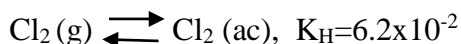
⁷ TESIS DIGITAL. Generalidades sobre el cloro [en línea]. 1.1. Reacciones del cloro en el agua. Disponible en Internet: <URL: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/23129/Capitulo1.pdf>

Figura 2. Curva de Demanda del Cloro



Fuente: Publicaciones de la Universidad de Alicante, 2009

El gas cloro se disuelve en agua de la siguiente manera:

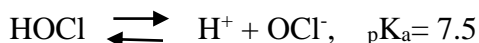


Siendo K_H la constante de disolución.

El cloro (ac) reacciona con agua, un átomo es oxidado a $\text{Cl}^{(+)}$ y el otro es reducido a $\text{Cl}^{(-)}$, esto es:



El ácido clorhídrico es un gas incoloro, muy corrosivo, compuesto de cloro e hidrógeno, se disocia completamente bajo condiciones de solución acuosa diluida. El ácido hipocloroso, es la denominación que se le otorga al ácido que resulta de la unión del óxido ácido de cloro con agua, es un ácido relativamente débil:



La adición de cloro gaseoso al agua bajará su alcalinidad debido a la producción de ácido fuerte y HOCl. Sin embargo, si el cloro es dosificado como sal de ácido hipocloroso.



Habrà un incremento en alcalinidad cuando reaccione con el H_2O .

Si se adiciona una cantidad conocida de cualquiera de las formas de cloro y después de un intervalo de tiempo (tiempo de contacto) se analiza el agua clorada (cloro residual), se puede encontrar menos cloro presente que el adicionado. Entonces se dice que el agua tiene una “demanda de cloro” después de un cierto tiempo de contacto, es decir:

Demanda de cloro = dosis de cloro – cloro residual

De esta manera se puede decir que la demanda de cloro es el resultado de una variedad de reacciones en las cuales el cloro se consume por varios componentes del agua y por desintegración.

La suma del HOCl y del OCl⁻ se llama cloro residual libre y es el desinfectante primario. HOCl es el desinfectante más efectivo, se produce por adición de Cl₂ al agua, con una reducción de pH la cual limita la conversión a OCl⁻.⁵

TEORÍA DE LA DESINFECCIÓN

Los factores que influyen en la desinfección del agua son los siguientes:

- *Los microorganismos presentes y su comportamiento*

Las bacterias como las del grupo coliforme y las salmonelas son las menos resistentes a la desinfección, pues su respiración se efectúa en la superficie de la célula. El número de microorganismos presentes en el agua no afecta el proceso de desinfección. Ello quiere decir que para matar una gran cantidad de microorganismos se requiere la misma concentración y tiempo de contacto del desinfectante que para eliminar una cantidad pequeña, siempre y cuando la temperatura y pH del agua sean los mismos.

- *La naturaleza y concentración del agente desinfectante*

Desinfectantes como el cloro y derivados pueden formar en el agua una serie de especies químicas cloradas, de diferente eficiencia desinfectante. Por otro lado, la concentración del desinfectante determinará el tiempo de contacto necesario para destruir todos los microorganismos presentes en el agua.

- *La temperatura del agua*

Por lo general, la temperatura favorece el proceso de desinfección. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la solubilidad de los agentes desinfectantes en estado gaseoso es inversamente proporcional a la temperatura.

- *La naturaleza y calidad del agua*

La materia en suspensión puede proteger a los microorganismos existentes en el agua e interferir en la desinfección. La materia orgánica puede reaccionar con los desinfectantes químicos y cambiar su estructura.

- *El Ph*

De acuerdo con su naturaleza, cada desinfectante tiene un rango de pH de mayor efectividad. Sin embargo, la práctica demuestra que cuanto más alcalina es el agua requiere mayor dosis de desinfectante para una misma temperatura y tiempo de contacto.

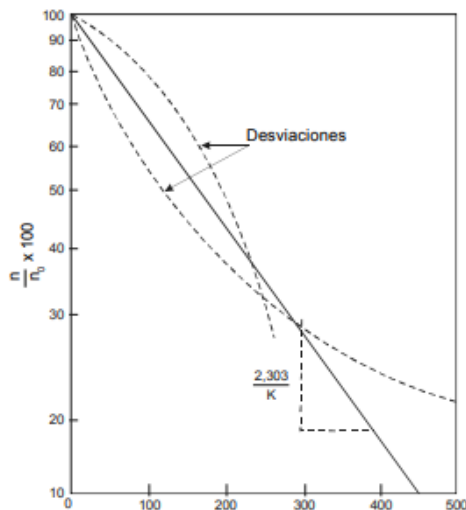
- *El tiempo de contacto*

Cuanto mayor es el tiempo de contacto, mayor será la posibilidad de destrucción de los microorganismos para una cierta dosis de cloro aplicado.

Cinética de la desinfección: La Ley de Chick

Cuando los microorganismos son expuestos bajo condiciones ideales a la acción de un desinfectante, la tasa de destrucción sigue la ley de Chick.

Figura 3. Representación gráfica de la Ley de Chick



Fuente: Richter, C. CEPIS, 1984.

Esta ley señala que el número de microorganismos destruidos por unidad de tiempo es proporcional al número de microorganismos remanentes.

En general, los virus son más resistentes a los desinfectantes que las bacterias, tal como se nota en la constante de velocidad, por ejemplo, del HOCl para E. Coli y para el virus de la poliomielitis.⁸

MODELACIÓN DE LAS REACCIONES QUÍMICAS

Dentro de la masa del fluido se producen reacciones químicas, que son función de la concentración del producto adicionado, de la tasa de reacción y del número de orden de la reacción:

$$(dc/dt) T \pm k * C^n$$

⁸ Richter, C. Desinfección. Manual DTIAPA C-5. Evaluación de Plantas de Tratamiento de Agua, tomo I. Lima, CEPIS, 1984.

C es la concentración (M/L³)
t es el tiempo (T)
k es la tasa de reacción [(L³/M) n-1/T]
n es el número de orden de la reacción

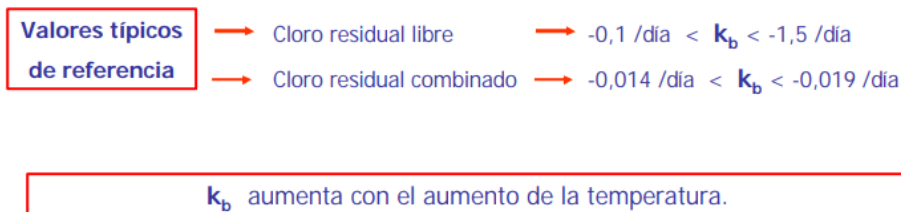
Si **k > 0** se trata de una reacción de formación
k < 0 se trata de una reacción de decaimiento

Datos necesarios para la modelación de reacciones químicas:

COEFICIENTE DE MASA k_b (Bulk coefficient): Puede estimarse colocando distintas muestras de agua de concentración inicial C_0 conocida en recipientes de vidrio inertes al cloro.

Midiendo en diferentes instantes la concentración C_t , se puede graficar el logaritmo natural de C_t/C_0 en función del tiempo. Si se trata de una reacción de primer orden, se obtendrá una recta cuya pendiente es k_b . (Universidad de Buenos Aires. Modelación calidad de agua).

Figura 4. Valores Coeficiente k_b



Fuente: Archivos Facultad Ingeniería UBA

COEFICIENTE DE PARED k_w (Wall coefficient): La determinación de k_w es más complicada que la de k_b . k_w depende de la temperatura y de las características de la tubería, especialmente del material y de la antigüedad. En las tuberías metálicas la rugosidad aumenta con la antigüedad, debido a incrustaciones y a los efectos de agentes corrosivos.

Algunas investigaciones sugieren que el mismo proceso que incrementa la rugosidad de las tuberías tendería a aumentar también la capacidad de reacción de las paredes, especialmente con el cloro y otros desinfectantes. (Universidad de Buenos Aires. Modelación calidad de agua).

Figura 5. Valores Coeficiente Kw

Valores típicos de referencia	→ Cloro residual libre →	$-0,06 \text{ m/día} < k_w < -1,52 \text{ m/día}$
	→ Cloro residual combinado →	$k_w \hat{V} -0,006 \text{ m/día}$

Fuente: Archivos Facultad Ingeniería UBA

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EPANET

El software EPANET, es utilizado para realizar análisis en el comportamiento hidráulico y de calidad en redes de distribución de agua. Se puede hacer una modelación de la red de tal forma que genere un modelo de calidad, en este caso el modelo de calidad del agua se toma para la referencia del cloro. Por medio de la propiedad *Tipo Modelo Calidad* en el editor de las *Opciones de Calidad*.

Se simula el transporte y decaimiento del cloro a través de la red. Introducir para ello los siguientes cambios en la base de datos:

1. Seleccionar la categoría *Opciones–Calidad* en la página de *Datos del Visor* y abrir el Editor de Propiedades correspondiente. En el campo *Tipo Modelo Calidad* introducir la palabra **Cloro**.
2. Pasar ahora a la categoría *Opciones-Reacciones* desde el mismo Visor. Introducir como *Coef. Global Reacc. Medio* el valor $-1,0$. Este dato refleja la velocidad a la cual disminuye la concentración de cloro debido a las reacciones que ocurren en el propio seno del agua. El mismo coeficiente será aplicado a todas las tuberías de la red, si bien se puede editar individualmente para cada tubería si fuera necesario.⁶
3. Pulsar ahora sobre el embalse y poner su Calidad Inicial a 1 (1 mg/l). Este valor indica la concentración de cloro que entra continuamente a la red. (Restablecer la calidad inicial en el depósito al valor 0 si se hubiera cambiado)⁹

Finalmente se ejecuta la simulación para observar el cambio de la concentración de cloro a través de la red y a lo largo del tiempo, se crea un informe (ver figura 5), de las reacciones habidas durante esta simulación donde se muestra cuánto cloro se pierde por término medio en las tuberías, frente al que se pierde en el depósito. El término “Medio” hace referencia a las reacciones que ocurren en el seno del agua, mientras que

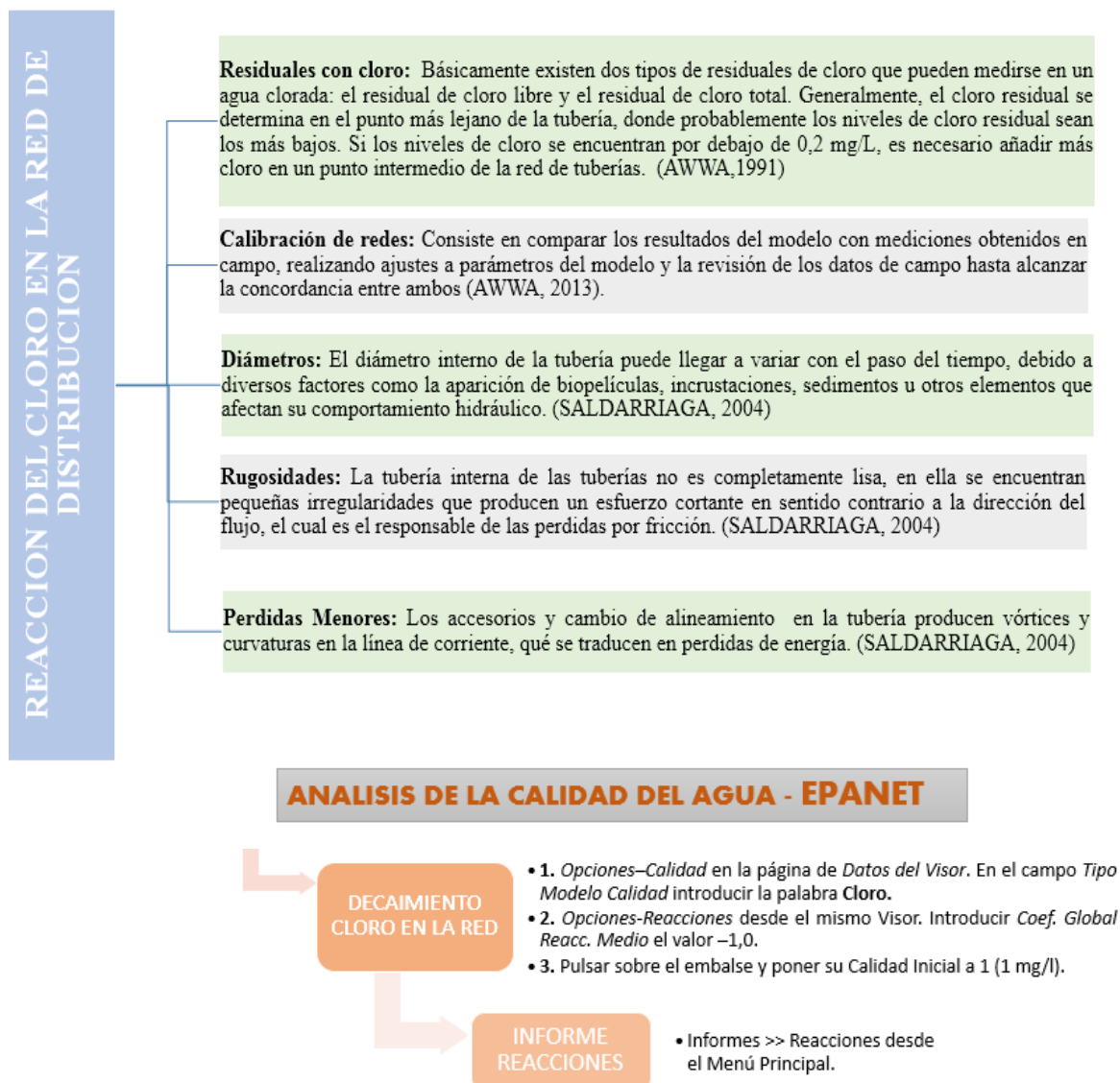
⁹ EPANET 2 USER’S MANUAL. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, 2000. p. 22

el rótulo “Pared” hace referencia a las reacciones que ocurren en las paredes de las tuberías.

1.6.2 Marco Conceptual

Se definen a continuación los aspectos más importantes y sobresalientes relacionados con el trabajo de investigación planteado.

Figura 6. Marco conceptual del proyecto



Fuente: El Autor

Reacciones del cloro en el agua y su relación con el proceso de cloración

La figura resume los tipos de reacción del cloro en el agua y su efecto en el proceso de desinfección.

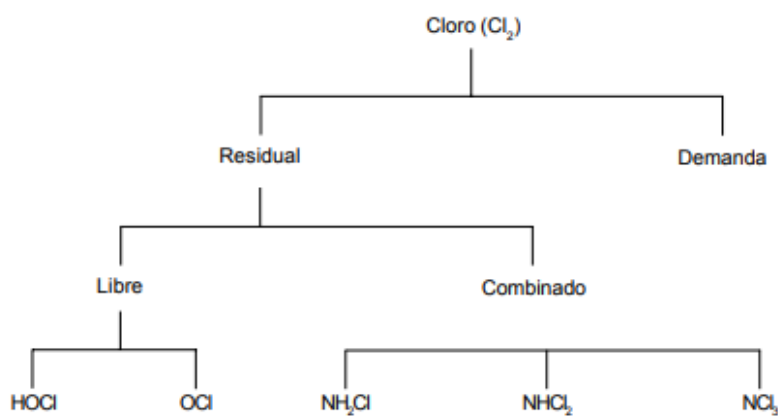
Figura 7. Tipos de reacción del cloro en el agua

Reaccionantes	Productos	Nombre	Efecto desinfectante
Agua	HOCl , OCl^-	Cloro libre	Potente
Nitrógeno amoniacal	Cloraminas	Cloro combinado	Pobre
Materia orgánica, Fe, Mn, SO_2 , H_2S , etc.		Demanda Cloro consumido	Nulo

Fuente: Richter, C. CEPIS, 1984

El siguiente diagrama permite entender que la cantidad de cloro que debe considerarse para la eliminación de microorganismos no forma parte de la denominada demanda sino del cloro residual (libre y combinado). Esto significa que la eliminación de los microorganismos no produce una disminución sensible de la cantidad de cloro residual, además de ejercer su acción bactericida, protege al agua contra posteriores contaminaciones.

Figura 8. Formas importantes del cloro en la cloración del agua



Fuente: Richter, C. CEPIS, 1984

1.6.3 Marco Legal

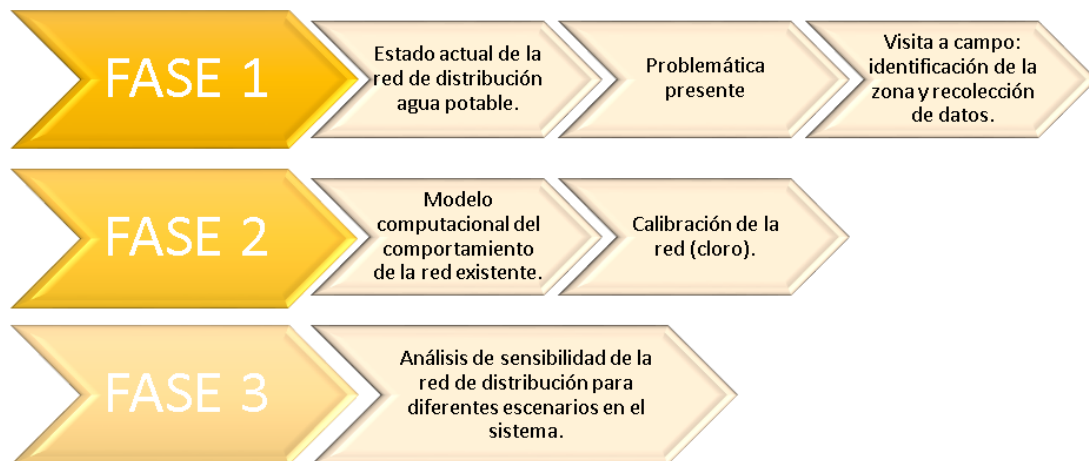
En la realización del proyecto se debe tener como guía la normatividad que aplica para acueductos, suministro y consumo de agua potable, entre otras que a continuación se mencionan:

- La Resolución 0330 de 2017 expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.
- Ley 142 de 1994 Nivel Nacional, Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.
- Decreto número 1575 de 2007, Ministerio de la Protección Social, Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.

1.7 METODOLOGIA

El trabajo se planteó en tres fases, las cuales se resumen en el siguiente diagrama

Figura 9. Resumen de la metodología desarrollada



Fuente: El Autor

1.7.1 FASE 1

En esta fase se efectuó la visita a campo para conocer el funcionamiento de la planta, conocer la aplicación de cloro en la red, es decir la dosis y tipo de dosificación que se emplea (liquido, gas, solido), identificar las redes de distribución de acuerdo al catastro de redes suministrado por la empresa de acueducto, y se realizó la toma de presiones en diferentes puntos del barrio Isidro Parra, para poder desarrollar la calibración de la red.

1.7.1.1 Estado actual de la RDAP

La información primaria es el catastro de redes el cual fue suministrado por la empresa de acueducto del municipio EMSER ESP.

El municipio del Líbano Tolima, cuenta con una RDAP en todo el casco urbano, siendo escasas en las zonas vulnerables conocidas como zonas de invasión. Más de un 90% de la tubería es antigua en material de asbesto cemento, las urbanizaciones nuevas del municipio son las únicas que poseen tubería en PVC.

El municipio del Líbano está ubicado al norte del Departamento del Tolima, tiene una temperatura media de 20 °C. Su población es de 47.650 habitantes (según el censo de 2005), lo que lo convierte en el tercer municipio más poblado del departamento.

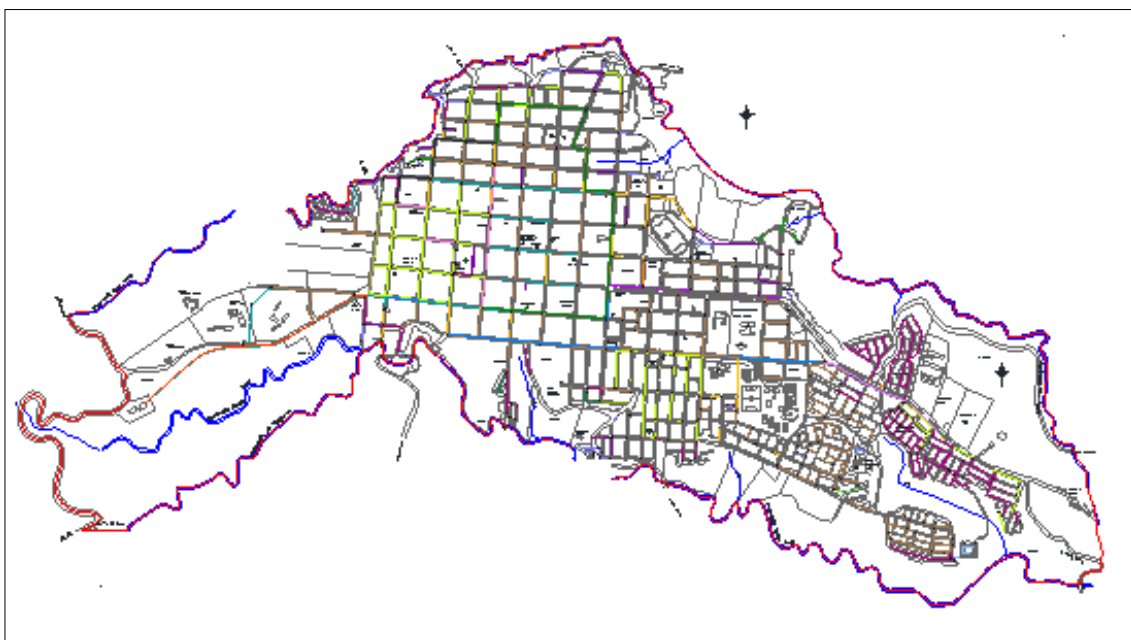
Figura 10. Localización del Líbano en el Tolima



Fuente: (Líbano, 2018)

Las fuentes de agua que abastecen la planta de tratamiento del municipio del Líbano son el río vallecitos y tres nacimientos como son: santa rosa, manantiales y san Juan.

Figura 11. Plano Red de distribución de agua potable del Líbano



Fuente: (EMSER ESP, 2018)

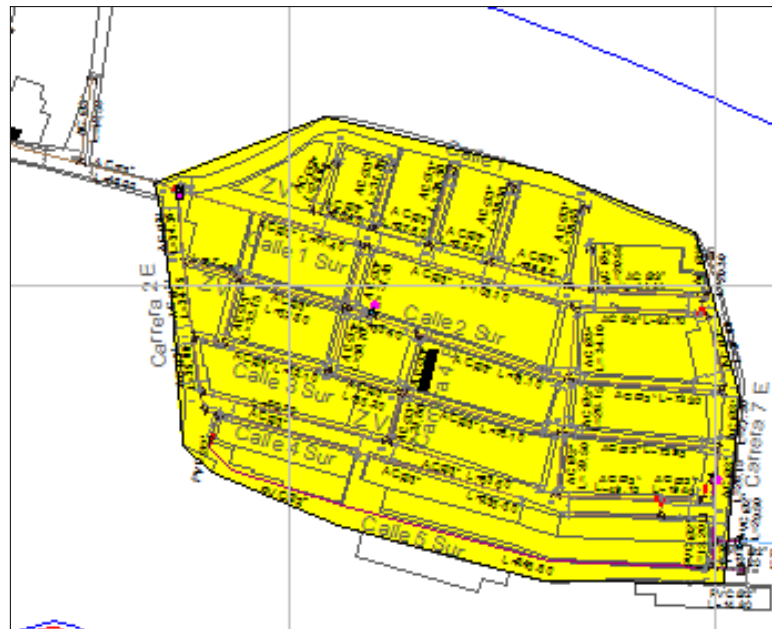
En el plano del catastro de redes suministrado se obtiene el trazado de la red del acueducto del municipio con sus debidas especificaciones de diámetro, material y longitud, en algunos tramos por la antigüedad y falta de información, el trazado se realizó con información historia de los trabajadores de la empresa y solo en el momento de daños o excavación a solucionar problemas de la tubería se ha notado que no es precisa la información del plano y es en ese momento en que el catastro de redes se empieza a actualizar.

1.7.1.2 Problemática presente

Actualmente la RDAP opera de manera empírica, las presiones son reguladas de acuerdo a la manipulación del caudal en la planta de tratamiento, no se tienen datos de presiones en la red, lo que genera daños frecuentes en la tuberías que repercuten en la suspensión del servicio, al restablecerse el agua suministrada evidencia una alta turbiedad, debido a los depósitos que se introducen en la tubería durante su conducción, esto genera que el agua de consumo no cuente con las condiciones óptimas de calidad que se requiere y se especule sobre la calidad de la misma.

La red del acueducto en el municipio del Líbano, es en un 90% en tubería de asbesto cemento, lo que genera el caso de estudio a indagar sobre los niveles de cloro con que está llegando el agua potable a los suscriptores. Debido a que la empresa EMSER no cuenta con datos sobre presiones de la red, el proyecto se limita a realizar la modelación a uno de los barrios más lejanos desde la planta de tratamiento, siendo este el barrio Isidro Parra.

Figura 12. Localización barrio Isidro Parra



Fuente: Catastro de redes municipio del Líbano, 2018

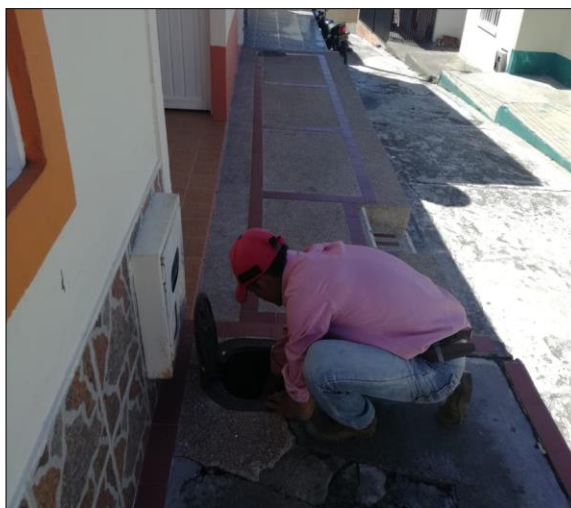
1.7.1.3 Información en campo

Para la obtención de los datos de la presión en la tubería, la empresa EMSER dispuso de personal para la toma de los datos, los cuales se obtendrían por medio de un manómetro Bourdon de diámetro 1/2" que la Universidad Católica de Colombia dispuso en calidad de préstamo.

Se inició haciendo un recorrido por la zona de trabajo para detectar de manera rápida los puntos más críticos y donde posiblemente se tuviera unos cambios de presiones significativos, teniendo en cuenta la pendiente del terreno, con estos criterios se tomaron los 12 puntos de muestreo, para ello el trabajador de EMSER debía desconectar los contadores de registro del agua de cada red domiciliaria de las viviendas y luego si ubicar el manómetro para obtener la presión en cada punto.

A continuación, se presenta algunas fotografías de este procedimiento en campo

Figura 13. Toma de presiones en campo



Fuente: El Autor

Figura 14. Manómetro Bourdon conectado a los medidores de agua



Fuente: El Autor

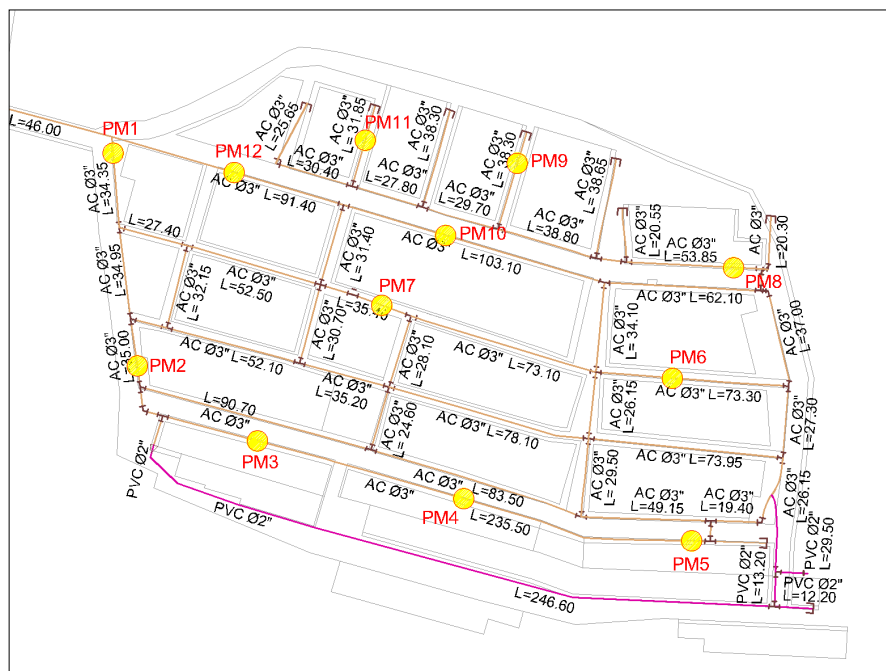
En la tabla 1, se describe los datos obtenidos en campo, estos se obtienen en unidades de PSI, pero para hacer la modelación en Epanet es necesario convertirlas a metro columna de agua (m.c.a), la ilustración 15 localiza esta información sobre el plano para tener una noción de lo realizado.

Tabla 1. Puntos de muestreo

Datos de presiones en campo		
PUNTO MUESTRA	PSI	MCA
PM1	36	25,33
PM2	32	22,51
PM3	30	21,11
PM4	32	22,51
PM5	33	23,22
PM6	32	22,51
PM7	30	21,11
PM8	34	23,92
PM9	32	22,51
PM10	42	29,55
PM11	30	21,11
PM12	32	22,51

Fuente: El Autor

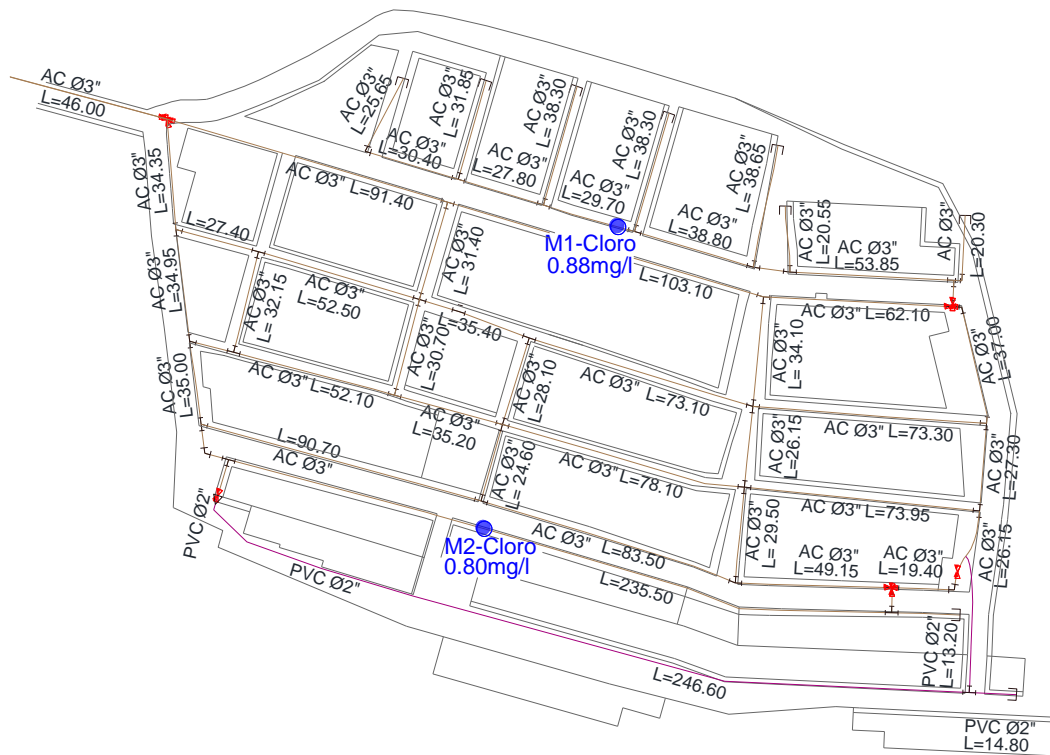
Figura 15. Localización puntos de muestreo



Fuente: El Autor

Adicional para conocer el porcentaje de cloro residual en la red se tomaron 2 muestras de agua en recipientes de vidrio, en los puntos donde se muestra en la figura 15, estas muestras se llevaron a la planta de tratamiento y con la ayuda de un colorímetro digital se obtuvo la información de que a la hora de la toma de la muestra (08:00am), en la zona del barrio, el agua contenía un 0.88 mg/l y 0.80 mg/l de cloro, como se evidencia en la figura 16, mientras que la medición para el cloro en el agua de salida de la planta de tratamiento es de 1.26 mg/l, lo que indica que hay una disminución o pérdida de cloro durante su recorrido por la red.

Figura 16. Ubicación puntos de muestra cloro



Fuente: El Autor

Figura 17. Análisis de la muestra del cloro en el Colorímetro digital



Fuente: El Autor

1.7.2 FASE 2

Con la información recolectada en la fase 1 se procede a la calibración hidráulica de la red de distribución y de las constantes de decaimiento de red según las mediciones realizadas en campo, donde se obtuvo el modelo computacional del comportamiento de la red existente.

1.7.2.1 Información previa

Una vez teniendo la información recopilada en campo de las presiones y el catastro de red del acueducto se dispone hacer la modelación en Epanet, para la obtención de la

calibración se hace necesario previamente otros factores como el terreno, donde se requiere conocer las cotas para ingresar los datos al programa, como la empresa de acueducto tampoco disponía de esta información, se utilizó el programa Global Mapper, que es una potente y asequible aplicación que combina una gama completa de herramientas de tratamiento de datos espaciales, es muy útil ya que es una herramienta independiente de gestión de datos SIG.

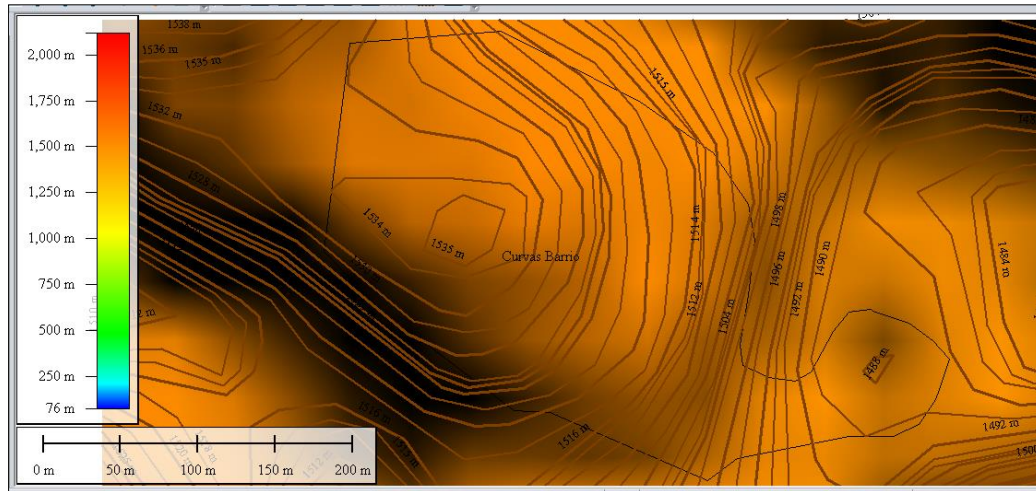
Figura 18. Imagen satelital Barrio Isidro Parra



Fuente: (Google Earth, 2018)

Para el proyecto se utilizó una imagen de Google Earth de la zona del barrio Isidro Parra del Líbano, la cual fue exportada al programa Global Mapper para obtener las curvas de nivel de la zona por medio de la imagen satelital que se observa en la figura 19.

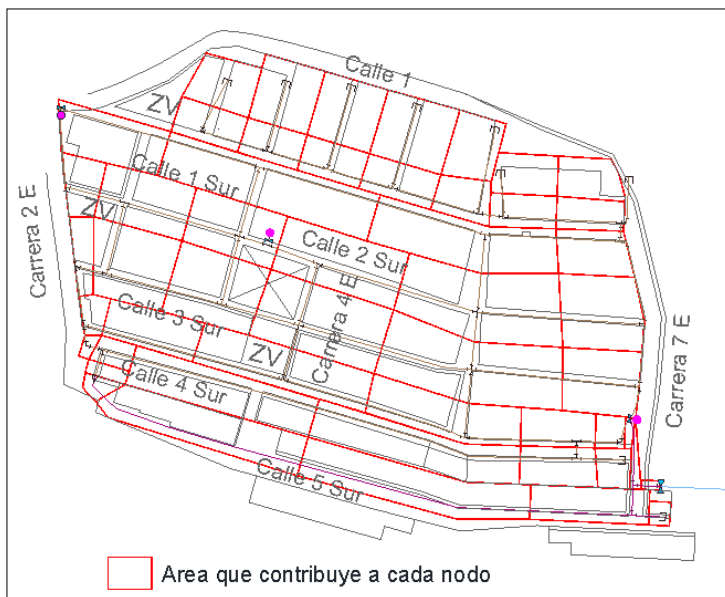
Figura 19. Pendientes en Global Mapper



Fuente: El Autor

Una vez exportada la imagen satelital al programa Global Mapper, se obtiene las pendientes del terreno o curvas de nivel, en este caso el terreno de la zona del barrio oscila entre 1530m y 1490m, se realizó interpolación de los puntos que se requerían de los nodos de la red. También se hizo necesario obtener las áreas de demanda base para cada nodo, se realizaron polígonos alrededor de los nodos, de tal manera que cubriera el área de demanda que se presume tenían, como se observa en la figura 20.

Figura 20. Áreas aferentes a los nodos



Fuente: El Autor

Obteniendo el área de aferencia se calcula el área de demanda base por nodo, se han estimado según la norma RAS la demanda media por m2 de 0.00013(l/s).m2 en viviendas unifamiliares, de acuerdo a eso se hace la conversión y se presenta la siguiente tabla:

Tabla 2 Demanda base por nodo

DEMANDA POR NODO			
NODO	Demanda Media (l/s) m2	Area m2	Qm total
1	0,00013	990,2	0,129
2	0,00013	400,41	0,052
3	0,00013	296,82	0,039
4	0,00013	186,73	0,024
5	0,00013	60,41	0,008
6	0,00013	202,14	0,026
7	0,00013	110,89	0,014
8	0,00013	120,67	0,016
9	0,00013	1488,86	0,194
10	0,00013	1152,68	0,150
11	0,00013	984,5	0,128
12	0,00013	1256,38	0,163
13	0,00013	1393,33	0,181
14	0,00013	1698,26	0,221
15	0,00013	1395,09	0,181
16	0,00013	1002,72	0,130
17	0,00013	1957,25	0,254
18	0,00013	1690,83	0,220
19	0,00013	2102,04	0,273
20	0,00013	1107,54	0,144
21	0,00013	1107,54	0,144
22	0,00013	1187,64	0,154
23	0,00013	521,58	0,068
24	0,00013	570,41	0,074
25	0,00013	1547,69	0,201
26	0,00013	1709,4	0,222
27	0,00013	794,49	0,103
28	0,00013	96,52	0,013
n67	0,00013	32,12	0,004
29	0,00013	44,4	0,006

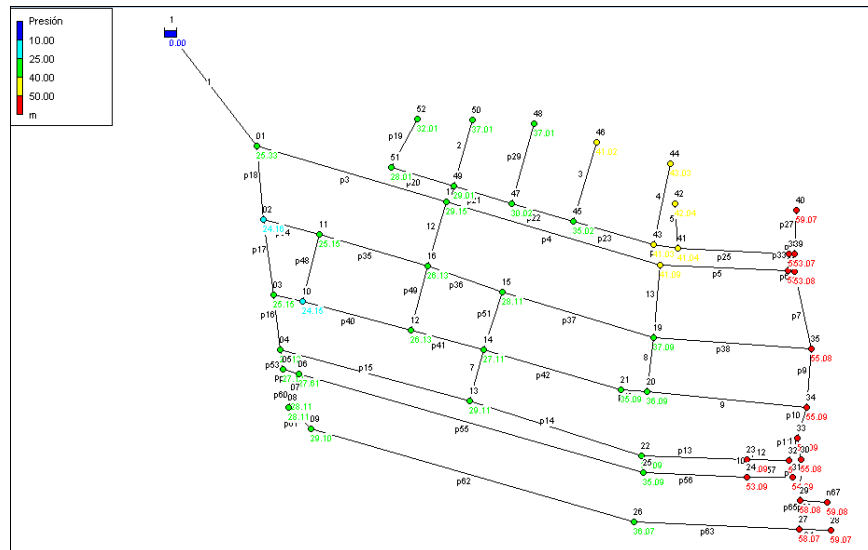
30	0,00013	44,42	0,006
31	0,00013	260,79	0,034
32	0,00013	185,15	0,024
33	0,00013	51,62	0,007
34	0,00013	951,4	0,124
35	0,00013	1138,08	0,148
36	0,00013	310,4	0,040
37	0,00013	310,42	0,040
38	0,00013	201,43	0,026
39	0,00013	201,43	0,026
40	0,00013	486,41	0,063
41	0,00013	423,91	0,055
42	0,00013	496,57	0,065
43	0,00013	431,95	0,056
44	0,00013	599,64	0,078
45	0,00013	520,56	0,068
46	0,00013	955,54	0,124
47	0,00013	454,47	0,059
48	0,00013	829,02	0,108
49	0,00013	431	0,056
50	0,00013	779,75	0,101
51	0,00013	486,47	0,063
52	0,00013	608,48	0,079

Fuente: El Autor

1.7.2.2 Modelación de la red

Se exportaron las líneas de la red desde el catastro de redes que se tiene en el software AutoCAD a Epanet, luego se le asignaron los respectivos datos a los nodos y tuberías; para las tuberías los datos de entrada fueron: longitud, diámetro y rugosidad, para los nodos los datos de entrada son la cota y demanda base, con el ingreso de estos datos se obtiene el modelo base en Epanet. Es de aclarar que el software incluye la ecuación de D-W en su modelación, la red trabaja con un flujo de periodo extendido, por lo que se le asigna la curva de demanda como se describe más adelante en el proceso de la modelación.

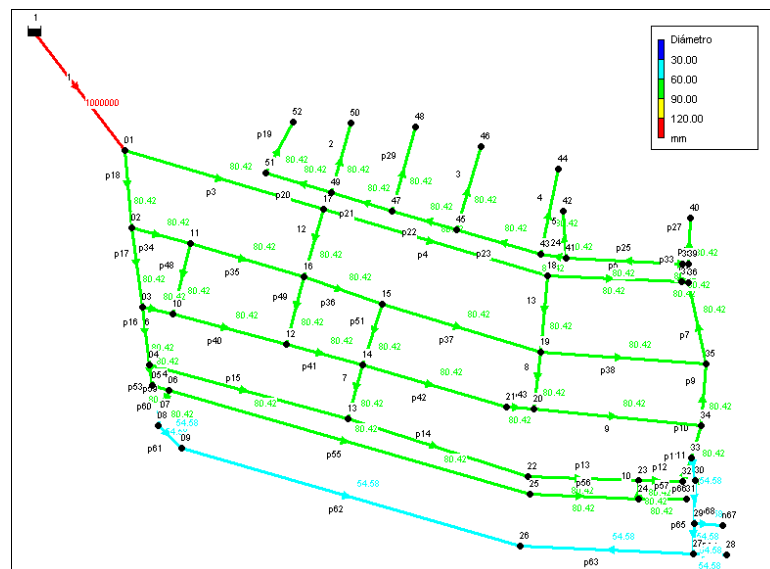
Figura 21. Modelación de la red en Epanet



Fuente: El Autor

La figura 21, muestra la modelación ya simulada con los datos de entrada de la tubería y nodos, los puntos rojos muestran las altas presiones que se generan en la parte baja del barrio, esto debido a la pendiente considerable que se presenta en el terreno, es de precisar que esta modelación generada es la que arroja el sistema, más adelante se describe la calibración con los datos recolectados en campo.

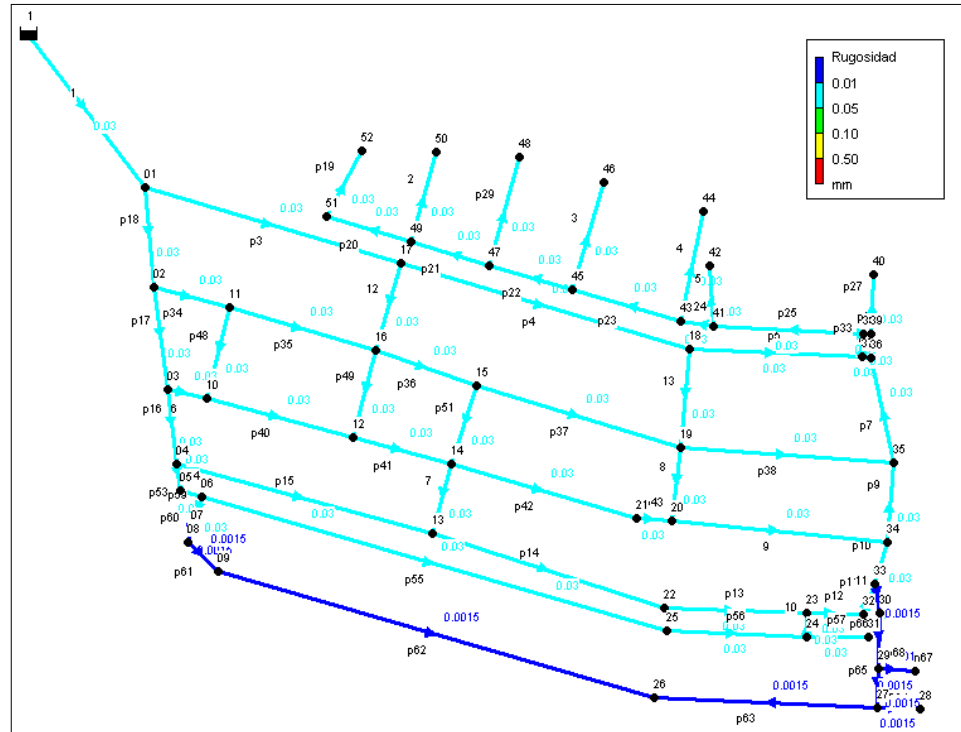
Figura 22. Diámetro de tuberías



Fuente: El Autor

Los diámetros de la tubería en este sector son de 80.42mm² (líneas verdes) y 54.58mm² las de línea agua marina, esto traduce a tuberías comerciales de diámetro 3 y 2 pulgadas.

Figura 23. Rugosidad de las tuberías



Fuente: El Autor

La RDAP presenta tramos en asbesto cemento y PVC, por lo cual en el modelo el coeficiente de rugosidad cambia según el material.

Se evidencia la rugosidad de la RDAP, siendo el azul rey, tuberías en PVC con un coeficiente de 0.0015 y azul agua marina, tuberías de asbesto cemento con coeficiente de 0.3.

1.7.2.3 Calibración de la red

La curva de modelación de la demanda que se utilizó para calibrar la red, se tomó de referencia de una de Alemania donde se estimó de manera muy aproximada las mediciones continuas del gasto en la tubería que abastece a determinada zona; por su lado, la curva de variación de la demanda medida se asume válida para cualquier otra tubería de la red, independientemente del número de usuarios al que da servicio, esta curva ha sido utilizada con éxito en calibración de redes en Colombia, ya que

contempla de una manera muy acertada los picos de consumo en las 24hr del día, en flujo con periodo extendido.

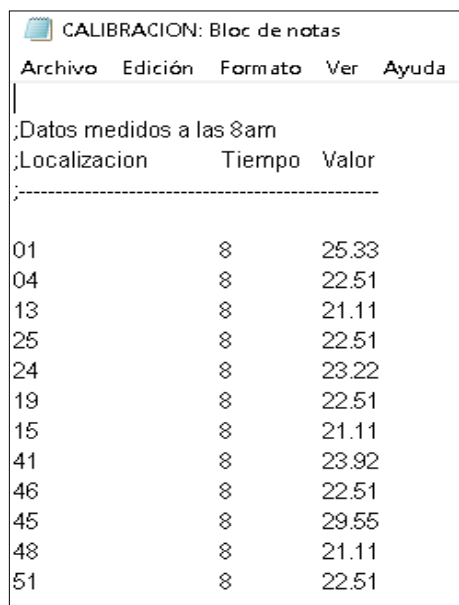
Tabla 3. Curva modelación de la demanda

Hora (h)	Consumo Horario (%)	Hora (h)	Consumo Horario (%)
01:00:00 a. m.	3	01:00:00 p. m.	7
02:00:00 a. m.	3	02:00:00 p. m.	7.5
03:00:00 a. m.	4	03:00:00 p. m.	4.5
04:00:00 a. m.	4	04:00:00 p. m.	4
05:00:00 a. m.	6	05:00:00 p. m.	3
06:00:00 a. m.	8	06:00:00 p. m.	2
07:00:00 a. m.	10.5	07:00:00 p. m.	2
08:00:00 a. m.	9	08:00:00 p. m.	1
09:00:00 a. m.	8	09:00:00 p. m.	0.5
10:00:00 a. m.	4	10:00:00 p. m.	0.5
11:00:00 a. m.	3	11:00:00 p. m.	0.5
12:00:00 p. m.	3	12:00:00 a. m.	2

Fuente: (Florián Pulido, 2017)

Para realizar la calibración se realiza un archivo block de notas el cual contiene los datos de la presión medida en campo (figura 15), de acuerdo a la numeración de los nodos en la modelación se identifican y se les otorga el valor de la presión en m.c.a como se estableció en la tabla 1.

Figura 24. Calibración de presiones

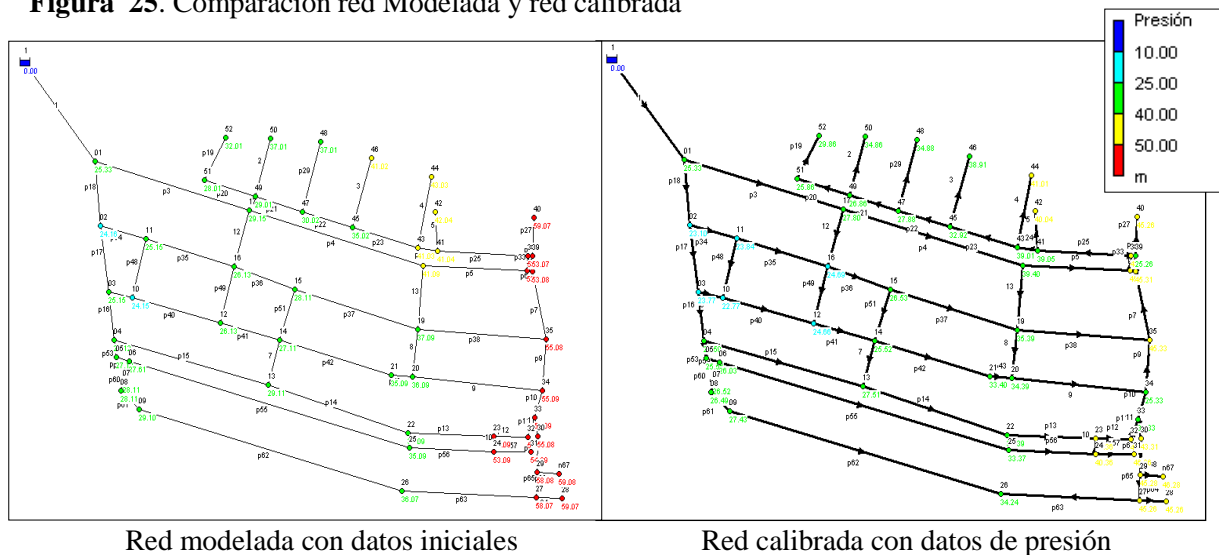


CALIBRACION: Bloc de notas		
Archivo	Edición	Formato Ver Ayuda
;Datos medidos a las 8am		
;Localizacion	Tiempo	Valor
;-----		
01	8	25.33
04	8	22.51
13	8	21.11
25	8	22.51
24	8	23.22
19	8	22.51
15	8	21.11
41	8	23.92
46	8	22.51
45	8	29.55
48	8	21.11
51	8	22.51

Fuente: El Autor

A continuación, se presenta el mapa de las redes generado en Epanet donde se evidencia la red modelada con los datos de entrada y la otra con la red calibrada de acuerdo a los datos de presión de campo, se observa que, según la escala de valores, la red calibrada ya no presenta puntos excesivos en presión, es decir superiores a 50 m.c.a.

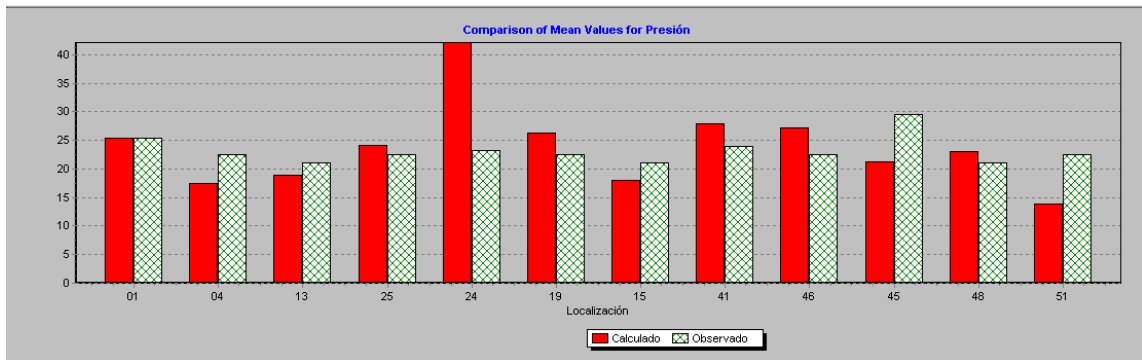
Figura 25. Comparación red Modelada y red calibrada



Fuente: El Autor

La red ya calibrada, arroja unos valores comparativos entre los datos observados y calculados, con un margen de error no superior al 10% aproximadamente en la mayoría de los nodos como se muestra en la figura 26 donde las barras de color rojo representan a la red modelada de acuerdo a los datos de entrada (diámetro, rugosidad, longitud, altura y demanda base) y las barras de achurado verde representan los datos de la red calibrada de acuerdo a los datos de presión tomados en campo. En la tabla 3 se puede observar los valores de esta comparación, en la columna 3 y 4 respectivamente.

Figura 26. Comparación valores de presión



Fuente: El Autor

Tabla 4. Informe de calibración de las presiones Epanet

Localización	N°	Observ Obs	Calc Media	Media Media	RMS Error
01	1	25.33	25.33	0.000	0.000
04	1	22.51	17.45	5.056	5.056
13	1	21.11	18.99	2.121	2.121
25	1	22.51	24.20	1.691	1.691
24	1	23.22	42.13	18.909	18.909
19	1	22.51	26.23	3.721	3.721
15	1	21.11	18.06	3.046	3.046
41	1	23.92	27.98	4.062	4.062
46	1	22.51	27.19	4.680	4.680
45	1	29.55	21.22	8.334	8.334
48	1	21.11	22.98	1.867	1.867
51	1	22.51	13.88	8.631	8.631
Sistema de Red 12		23.16	23.80	5.176	7.068

Fuente: El Autor

1.7.2.4 Calibración del cloro

La calibración de cloro que se realizará en la red modelada será con el fin de encontrar los coeficientes con los que el cloro está reaccionando con la tubería y el flujo.

La reacción Kb es la constante que reacciona con el medio, puede ser positiva o negativa dependiendo de la sustancia, para el caso del cloro su evolución es decreciente por tanto es negativa.

En la modelación Epanet se definen las opciones de calidad necesaria para realizar el análisis de la evolución de concentración del cloro, por medio de la herramienta de *Opciones de Calidad*.

Figura 27. Parámetros de calidad del cloro

Opciones de Calidad		Opciones de Reacciones	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Parámetro	CLORO	Orden Reacción Flujo	1
Unidades Densidad	mg/L	Orden Reacción Pared	Primer
Difusividad Relativa	1	Coef. Global Flujo	-1
Nudo Procedencia	1	Coef. Global Pared	-1
Tolerancia de Calidad	0.01	Concentración Límite	0
		Coef. Correlación Pared	10

Fuente: El Autor

El coeficiente de Difusión Relativo, por estar referido al cloro su valor será 1. Dentro de las opciones de reacciones el orden de reacción del flujo establece el orden cinético de reacción con el medio (potencia a la cual hay que elevar la concentración para determinar la velocidad de reacción) para el caso del cloro por lo general es 1 y cuando no hay reacción se convierte a 0. El orden de reacción de pared es similar al del medio, es posible establecer el orden cinético de reacción de la sustancia con las paredes de las tuberías.

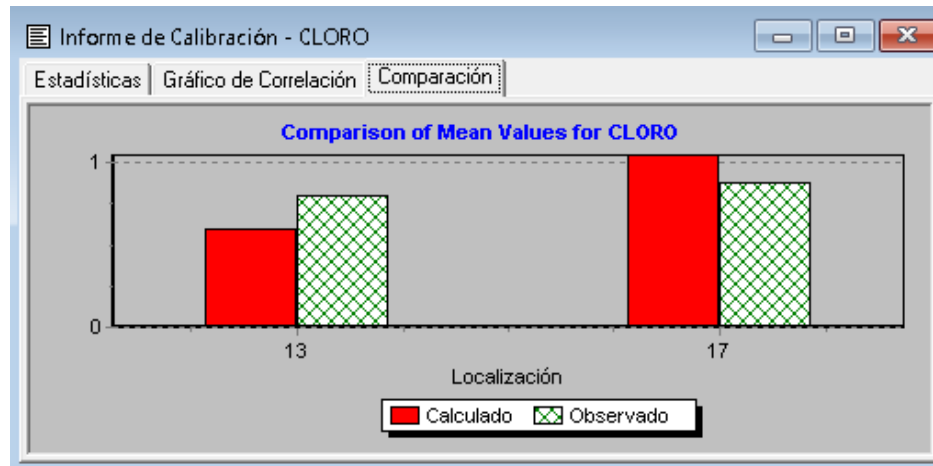
Coeficiente global del flujo hace referencia al Kb y el coeficiente de pared es la constante Kw, los cuales tienen unos valores típicos de referencia que como se describe en la literatura.

Concentración limite hace referencia a la concentración máxima o mínima que puede alcanzar una sustancia cuando crece o decrece con el tiempo, en nuestro caso se fija una concentración mínima de cloro con valor de 0.

Coeficiente de correlación de la pared es el que relaciona el coeficiente de pared con la rugosidad de la tubería, de acuerdo a ensayos realizados varía entre 10 y 650.

La calibración de cloro obtenida con los Kw y Kb ubicados en valor de -1 cada uno, no es muy diferente con los valores tomados en campo (figura 16 y 17), lo que indica que la modelación se realiza de manera acertada a lo que realmente se encuentra en funcionamiento.

Figura 28. Comparación Cloro

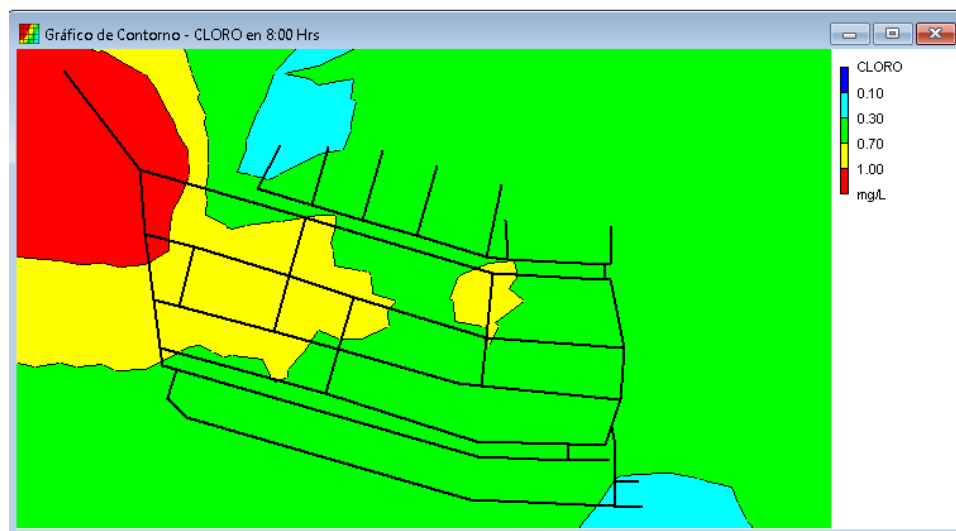


Fuente: El Autor

En la figura 28 se evidencia la comparación de la calibración del cloro, por medio de un diagrama de barras en donde las de color rojo son los datos de cloro de la red modelada y las barras de achurado verde son los datos del cloro en la red calibrada.

La grafica del contorno, figura 29, se visualiza las zonas de acuerdo a los niveles de cloro, indicando que la mayoría de la red se encuentra entre 0.3 mg/l cumpliendo con el rango minino permisible, mas sin embargo existen unos puntos que se encuentran por debajo de 0.2mg/l, estos se evidencian en la figura 30.

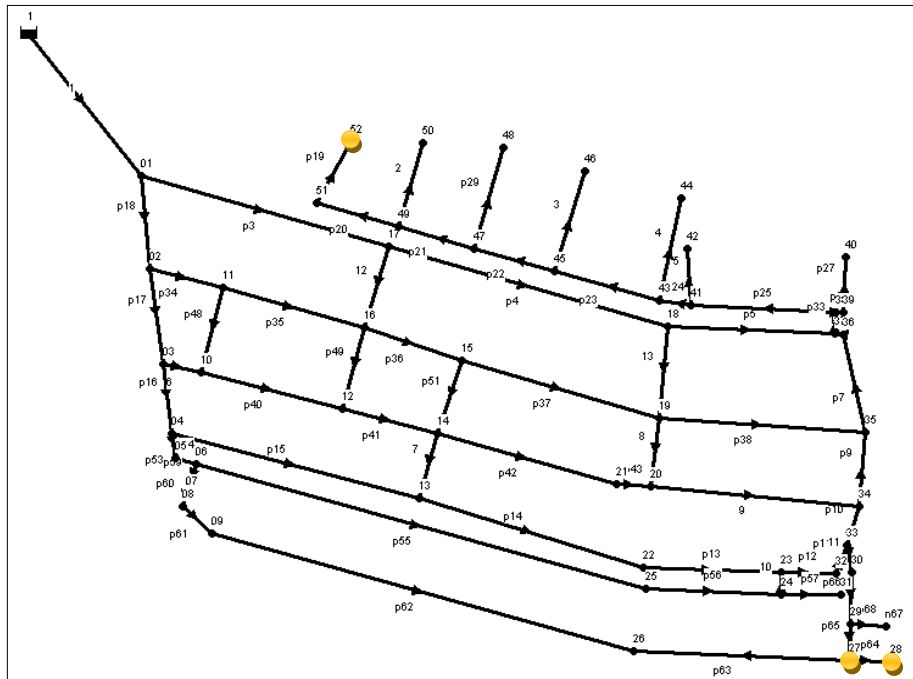
Figura 29. Contorno niveles de Cloro



Fuente: El Autor

En el anexo a, se observa la tabla de la obtención de cloro en todos los nodos; Por norma sabemos que el nivel mínimo permitido es de 0.2mg/l y según el análisis de la tabla los nodos que se encuentran por debajo de este valor son la conexión 27, 28 y 52. A continuación se ubica la figura 30, para poderlos identificar.

Figura 30. Nodos con bajo nivel de Cloro

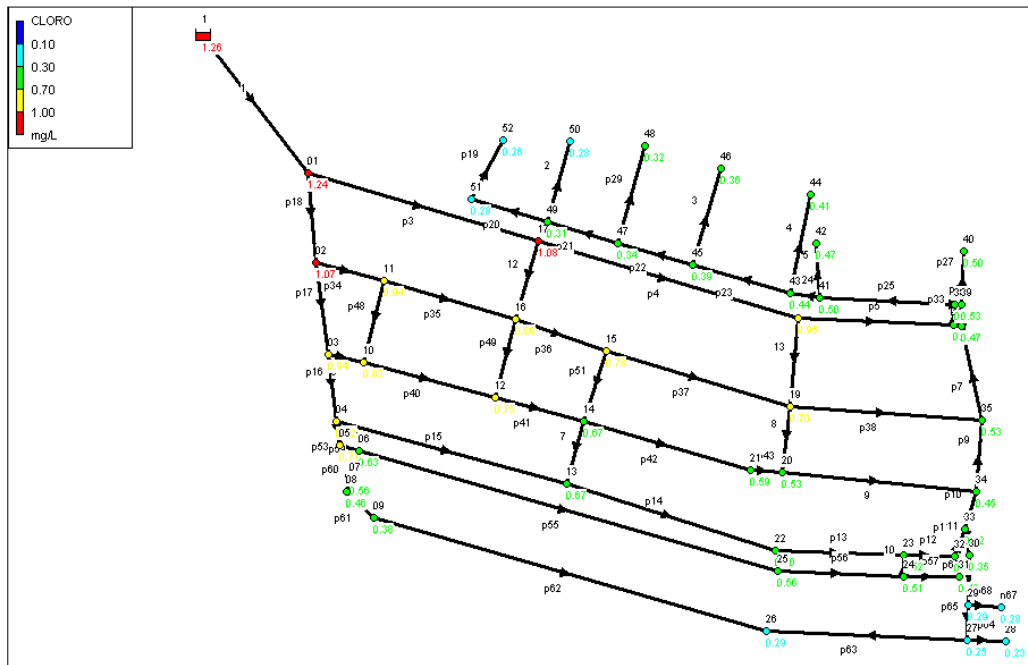


Fuente: El Autor

En el anexo b, se encuentran las tablas de los nodos 27, 28 y 52 con su debida corrección para que los parámetros de cloro cumplieran, para esto los coeficientes de reacción K_b y K_w , se ubicaron con el valor de -0.8 cada uno, de esta manera cumplen y no quedarían dosis de cloro inferiores a 0.2 mg/l, se aclara que la única hora en que no se percibe cloro es a las 0:00 horas, ya que este se comporta de acuerdo al consumo y a esta hora no hay consumo, por lo que el cloro se está perdiendo en la pared de la tubería por la ausencia de movimiento del fluido.

La figura 31 muestra la red con la calibración del cloro final, donde contempla los valores con las correcciones realizadas en el anexo b, los coeficientes K_w y K_b que se utilizaron para la calibración corregida fueron de -0.8, es decir que ningún punto quedo con suministro de cloro por debajo de 0.2mg/l.

Figura 31. Red de cloro calibrada.



Fuente: El Autor.

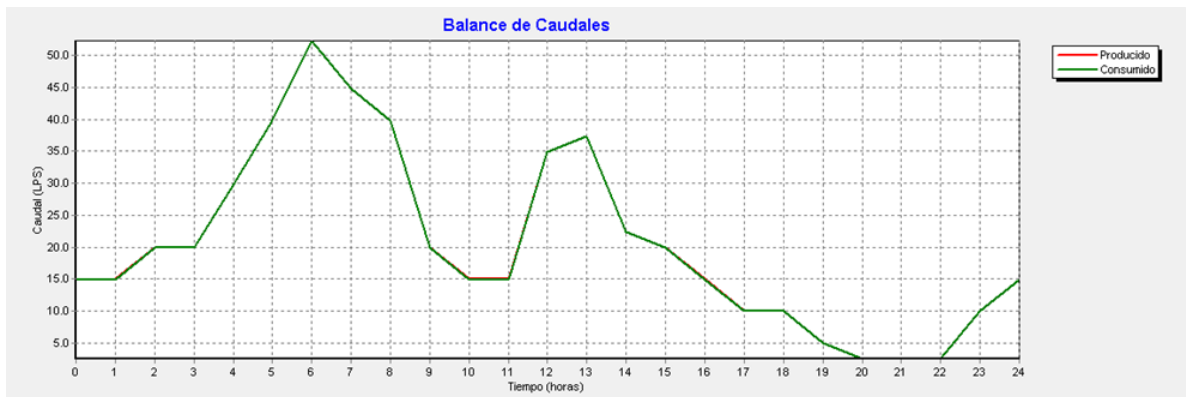
1.7.3 FASE 3

Esta es la fase final, se realizó el análisis de sensibilidad de la red de distribución para diferentes escenarios en el sistema, estos se detallan en el siguiente capítulo de análisis comparativos.

2. ANALISIS COMPARATIVOS Y RESULTADOS

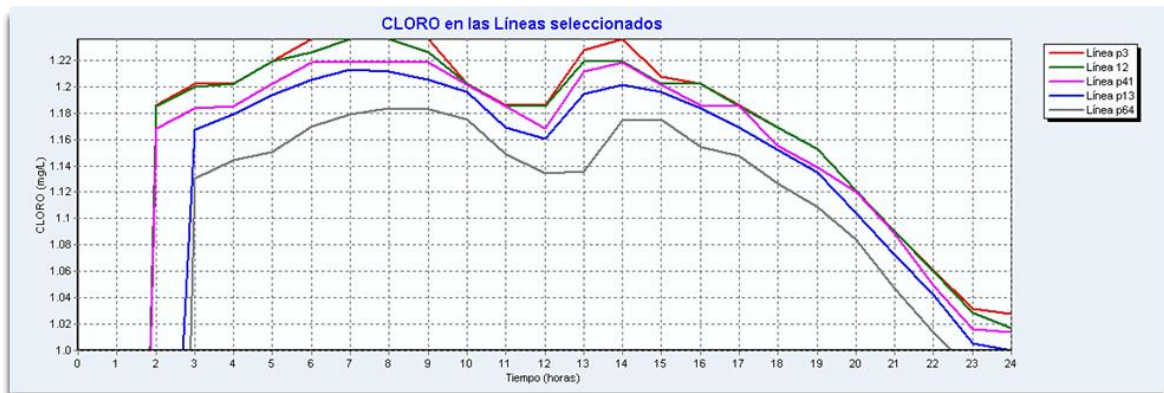
Se obtuvieron graficas del comportamiento del cloro en cinco tuberías seleccionadas aleatoriamente en todo el sector para conocer su comportamiento; se evidencia que todas tienen un comportamiento similar y que reaccionan de acuerdo al consumo; esto se demuestra con la gráfica del balance de caudales, donde el comportamiento es muy similar al del cloro, es decir que en los picos más altos de consumo, también se presentan los más altos de cloro, en las horas donde no hay consumo el cloro decae de manera justificable por su permanencia en la red, reacciona con las paredes de la tubería y esto genera esa disminución.

Figura 32. Balance de caudales



Fuente: El Autor

Figura 33. Comportamiento del cloro en la tubería



Fuente: El Autor

Para ver el comportamiento de la red en tubería de otro material se modelo con tubería de PVC, es decir se cambiaron los datos de entrada de las rugosidades a toda la red y se le otorgaron los valores de 0.0015 correspondientes a este material.

Se obtuvo que el cambio de rugosidad no indica unos cambios fuertes en comparación con la tubería de asbesto cemento, las velocidades y niveles de cloro cambian en algunos puntos, pero en su mayoría se mantiene igual. Se podría decir con este análisis que, si se llegase a cambiar la tubería del acueducto, esta no variaría mucho los coeficientes de cloro actualmente establecidos.

Tabla 5 Comparación datos con rugosidades diferentes

ID Línea	TUBERIA PVC			TUBERIA ASBESTO CEMENTO		
	Rugosidad	Velocidad	COLORO	Rugosidad	Velocidad	COLORO
	mm	m/s	mg/L	mm	m/s	mg/L
Tubería p3	0.0015	3.05	1.24	0.03	3.07	1.24
Tubería p4	0.0015	1.39	1.08	0.03	1.39	1.08
Tubería p5	0.0015	0.95	0.95	0.03	0.94	0.95
Tubería p6	0.0015	0.73	0.48	0.03	0.74	0.47
Tubería p7	0.0015	0.80	0.55	0.03	0.80	0.53
Tubería p9	0.0015	0.46	0.45	0.03	0.47	0.45
Tubería p10	0.0015	0.18	0.44	0.03	0.18	0.42
Tubería p11	0.0015	0.50	0.47	0.03	0.50	0.47
Tubería p12	0.0015	0.54	0.52	0.03	0.54	0.52
Tubería p13	0.0015	0.51	0.60	0.03	0.51	0.60
Tubería p14	0.0015	0.75	0.67	0.03	0.76	0.67
Tubería p15	0.0015	0.61	0.83	0.03	0.60	0.82

Tubería p16	0.0015	1.92	0.94	0.03	1.91	0.94
Tubería p17	0.0015	2.23	1.07	0.03	2.21	1.07
Tubería p18	0.0015	4.60	1.24	0.03	4.58	1.24
Tubería p19	0.0015	0.12	0.28	0.03	0.12	0.28
Tubería p20	0.0015	0.22	0.33	0.03	0.22	0.31
Tubería p21	0.0015	0.47	0.35	0.03	0.47	0.34
Tubería p22	0.0015	0.73	0.39	0.03	0.73	0.39
Tubería p23	0.0015	1.04	0.44	0.03	1.04	0.44
Tubería p24	0.0015	1.25	0.50	0.03	1.25	0.50
Tubería p25	0.0015	1.44	0.57	0.03	1.44	0.57
Tubería p26	0.0015	0.14	0.57	0.03	0.14	0.57
Tubería p27	0.0015	0.10	0.53	0.03	0.10	0.53
Tubería p29	0.0015	0.17	0.34	0.03	0.17	0.34
Tubería p33	0.0015	1.62	0.65	0.03	1.62	0.65
Tubería p34	0.0015	2.30	1.07	0.03	2.29	1.07
Tubería p35	0.0015	1.13	0.94	0.03	1.12	0.94
Tubería p36	0.0015	1.50	0.91	0.03	1.51	0.89
Tubería p37	0.0015	0.93	0.78	0.03	0.93	0.78
Tubería p38	0.0015	0.57	0.70	0.03	0.57	0.70
Tubería p40	0.0015	0.98	0.83	0.03	0.97	0.83
Tubería p41	0.0015	1.40	0.75	0.03	1.40	0.75
Tubería p42	0.0015	0.90	0.67	0.03	0.90	0.67
Tubería p43	0.0015	0.68	0.59	0.03	0.68	0.59
Tubería p48	0.0015	0.97	0.94	0.03	0.97	0.94

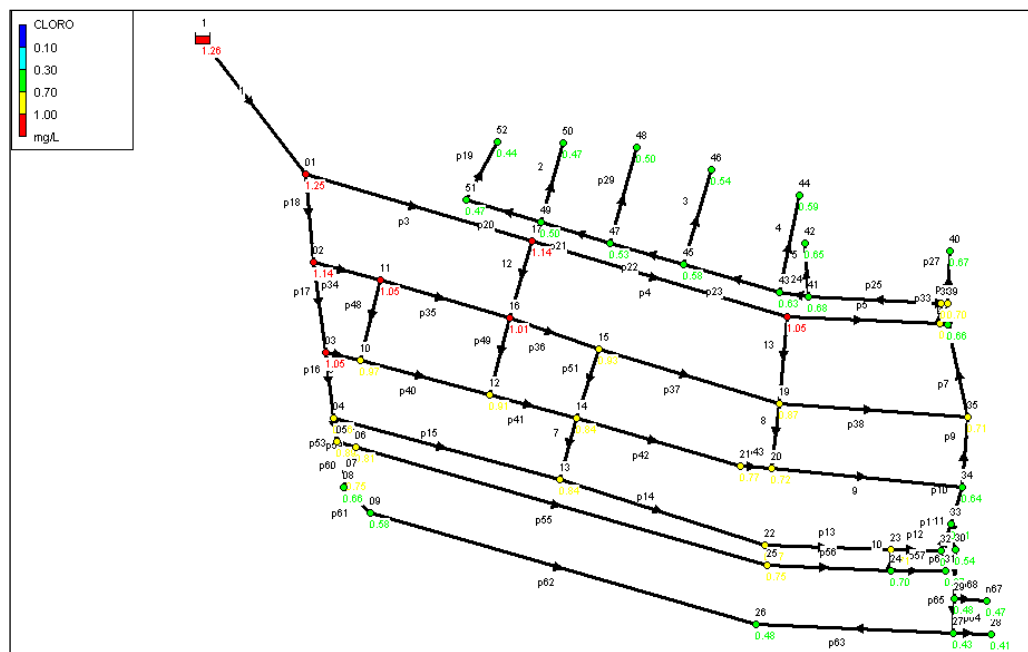
Tubería p49	0.0015	0.67	0.89	0.03	0.68	0.89
Tubería p51	0.0015	0.29	0.78	0.03	0.29	0.78
Tubería p53	0.0015	1.27	0.82	0.03	1.27	0.82
Tubería p54	0.0015	1.26	0.71	0.03	1.26	0.71
Tubería p55	0.0015	0.62	0.63	0.03	0.62	0.63
Tubería p56	0.0015	0.30	0.56	0.03	0.30	0.56
Tubería p57	0.0015	0.05	0.51	0.03	0.05	0.51
Tubería p59	0.0015	0.60	0.63	0.03	0.60	0.63
Tubería p60	0.0015	1.26	0.56	0.0015	1.26	0.56
Tubería p61	0.0015	1.20	0.46	0.0015	1.21	0.46
Tubería p62	0.0015	0.54	0.38	0.0015	0.55	0.38
Tubería p63	0.0015	0.22	0.25	0.0015	0.21	0.24
Tubería p64	0.0015	0.04	0.25	0.0015	0.04	0.25
Tubería p65	0.0015	0.62	0.29	0.0015	0.61	0.29
Tubería p66	0.0015	0.65	0.35	0.0015	0.64	0.35
Tubería p68	0.0015	0.01	0.29	0.0015	0.01	0.29
Tubería 1	0.0015	0.00	1.25	0.03	0.00	1.25
Tubería 2	0.0015	0.16	0.31	0.03	0.16	0.31
Tubería 3	0.0015	0.20	0.39	0.03	0.20	0.39
Tubería 4	0.0015	0.12	0.44	0.03	0.12	0.44
Tubería 5	0.0015	0.10	0.53	0.03	0.10	0.50
Tubería 6	0.0015	0.25	0.94	0.03	0.24	0.94
Tubería 7	0.0015	0.43	0.67	0.03	0.44	0.67
Tubería 8	0.0015	0.03	0.70	0.03	0.03	0.69

Tubería 9	0.0015	0.48	0.53	0.03	0.48	0.53
Tubería 10	0.0015	0.13	0.51	0.03	0.13	0.51
Tubería 11	0.0015	0.67	0.42	0.0015	0.67	0.42
Tubería 12	0.0015	1.25	1.08	0.03	1.28	1.08
Tubería 13	0.0015	0.10	0.96	0.03	0.10	0.95

Fuente: El Autor

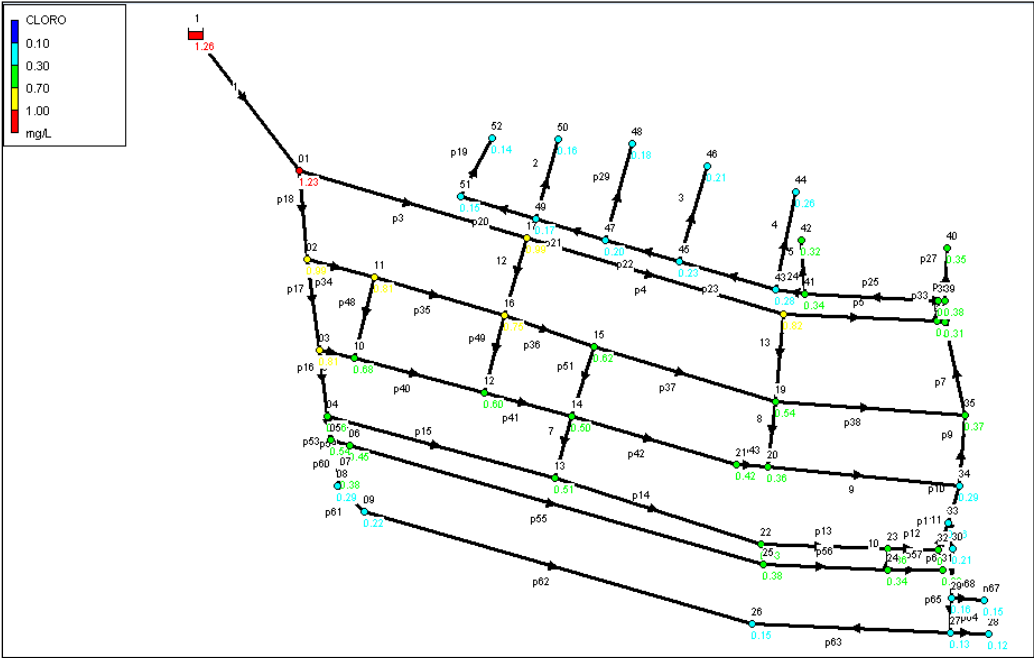
Se realizó simulaciones en el comportamiento del cloro con diferentes valores de los coeficientes de reacción K_w y K_b , teniendo de partida el valor de los coeficientes de la calibración, para valores inferiores a -0.8, los niveles del cloro aumentan como se ve en la figura 34 y para valores mayores a -0.8, los niveles de cloro disminuyen de manera que muchos puntos quedan con suministro de cloro residual libre por debajo de 0.2mg/l situación que no es admisible.

Figura 34 Simulación del cloro con K_w y K_b en -0.5



Fuente: El Autor

Figura 35 Simulación del cloro con Kw y Kb en -1.2



Fuente: El Autor

3. CONCLUSIONES

Los datos recolectados en campo fueron fundamentales ya que dieron el inicio a la modelación de la red existente y permitieron realizar la calibración de la misma con aproximación a la realidad.

De acuerdo a la información suministrada por la empresa de acueducto y alcantarillado del Líbano Tolima EMSER ESP y la recolectada en campo, se generó un modelo digital de la red de distribución de agua potable del municipio del Líbano, con el fin de conocer los coeficientes de reacción del cloro y contemplar la calidad del agua suministrada a la comunidad, este modelo se desarrolló en el programa EPANET.

Los coeficientes de reacción del cloro K_b y K_w obtenidos para garantizar la dosis de cloro mínima permisible fueron de -0.8, encontrándose este valor dentro del rango que establece la literatura.

Es importante destacar la dificultad que se presenta para la determinación del valor de los coeficientes, en el caso del cloro el decaimiento obedece a numerosos factores difícilmente cuantificables, como las características propias del agua transportada.

Tanto el ingreso de los datos, como los comparativos, se realizaron con referencia a la hora de la toma de información en campo (8:00hr), para dar un balance más acertado a la realidad y con aproximación verídica.

La RDAP como se manifestaba en el planteamiento del problema, es una red antigua de asbesto cemento, con los resultados obtenidos se puede cerciorar sobre la calidad de la desinfección del agua de distribución, está es de buena calidad, presenta buen nivel de cloro, lo que indica que a pesar de ser una tubería no muy optima el cloro mantiene sus niveles constantes cumpliendo con la normatividad.

El cloro tiene influencia con el consumo, pues en horas donde hay poco consumo el cloro tiende a disminuir por permanecer en contacto con la pared de la tubería, la concentración de cloro no se estabiliza en un valor concreto, sino que fluctúa a lo largo del día entre un valor mínimo y un valor máximo. En las horas de poco consumo es donde se encuentran los niveles mínimos de cloro.

4. RECOMENDACIONES

Es de gran importancia que la empresa de acueducto del municipio pueda tener datos de las presiones de su RDAP, actualice y complemente el catastro de redes existente para obtener mapas y modelos de todo el sistema de manera verídica, lo que facilita la optimización del funcionamiento o la prevención de problemas frecuentes en la red.

Realizar mantenimiento en la red evitando los depósitos sólidos dentro de la misma, ya que cuando se reportan daños en la tubería estos se filtran y son transportados a lo largo de la red lo que genera turbiedades en el agua.

Se recomienda hacer tomas de muestra de cloro en diferentes puntos del municipio para controlar la calidad de desinfección. A su vez se encarga que la dosificación del cloro en la planta se realice de una forma adecuada y no exagerando en la misma.

BIBLIOGRAFÍA

TZATCHKOV, Velitchko., ALCOCER Y, Víctor. ARREGUIN C, Felipe Ignacio. Decaimiento del cloro por reacción con el agua en redes de distribución. En: Ingeniería hidráulica en México. Enero-marzo 2004, vol.19.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. [en línea]. Ginebra: [Citado 22 de marzo, 2018]. Guías técnicas sobre saneamiento, agua y salud. Disponible en Internet: <URL: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf.

DECRETO 475 de 1998 “Normas técnicas de calidad del agua potable”. Bogotá: DIARIO OFICIAL. AÑO CXXXIII. N. 43259. 16 marzo 1998.

SALDARRIAGA, Juan y JURADO, Cesar Mauricio. Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable. Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros, XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, 2008.

TESIS DIGITAL. Generalidades sobre el cloro [en línea]. México: Documentos [Citado 22 de marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/23129/Capitulo1.pdf>

EPANET 2 USER’S MANUAL. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, 2000.

FONDO DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA INFANCIA O UNICEF. El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo. Capítulo 1: El estado del agua, el alcantarillado y los residuos sólidos en los municipios [en línea]. Bogotá: UNICEF [citado 25 marzo de 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.unicef.org/colombia/pdf/Agua3.pdf>>

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SANTO DOMINGO. Ingeniería Sanitaria I, Manual de prácticas. Santo Domingo, 1999.

AWWA, Back to Basics Guide to Disinfection with Chlorine, Denver, 1991.

WEBER, Walter J. Control de la calidad del agua Procesos Fisicoquímicos. España: [Reverte, S.A], febrero 2003.

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. Publicación científica N°508, Guías para la calidad de agua potable. Vol. 3. Washington, 1988.

AWWA (2013). Committee Report: Defining model calibration. Journal of American Water Works Association, Vol. 105, Julio 2013.

EMSER E.S.P. Empresa de servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo del el Líbano. 14 marzo de 2018 < <http://www.emseresp.com/>>

COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Bogotá: El Ministerio, 2000.

Walski, T. Technique for calibrating network models. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 109- 4, Octubre 1983.

CHÁVEZ, Z.C., FUENTES, O. y OSNAYA, R.J. Modelo para obtener la concentración del cloro en las redes de tuberías, Memorias del XVI Congreso Nacional de Hidráulica. Avances en hidráulica Morelia, México 2000.

Richter, C. Desinfección. Manual DTIAPA C-5. Evaluación de Plantas de Tratamiento de Agua, tomo I. Lima, CEPIS, 1984.

12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013, Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX, Disponible en Internet: <URL: www.sciencedirect.com

THE ITALIAN ASSOCIATION OF CHEMICAL ENGINEERING, Modeling Chlorine Decay in Drinking Water Distribution Systems using Aquasim, VOL. 57, 2017.

ORMSBEE, L.E. y LINGIREDDY, S., 1997. Calibrating hydraulic network models. En: NULL, American Water Works Association [en línea], vol. 89, no. 2, pp. 42, 50. Disponible en: <http://search.proquest.com.ezproxyucdc.ucatolica.edu.co:2048/docview/221535166/citation/8D106464D22B45EEPQ/1?accountid=4566>

FLORIÁN, S.B. Propuesta de optimización del servicio de la red de distribución de agua potable -RDAP- del municipio de Madrid, Cundinamarca. Trabajo de Investigación, Universidad Católica de Colombia. Bogotá, 2017.

CARE INTERNACIONAL-AVINA. Operación y mantenimiento de sistemas de agua potable. Quitó: Programa Unificado de Fortalecimiento de Capacidades, 2012.

CASTRO, P. y NEVES, M. Chlorine Decay in Water Distribution Systems Case Study – Lousada Network. Universidad de Porto, Portugal, 2003

ANEXOS

Anexo a. Tabla comportamiento de la red – presión y cloro

Tabla de Red - Nudos en 8:00 Hrs				
ID Nudo	Demanda Base LPS	Altura m	Presión m	COLORO mg/L
Conexión 01	0.129	1557.33	25.33	1.24
Conexión 17	0.254	1547.59	19.59	1.04
Conexión 18	0.22	1545.11	29.11	0.88
Conexión 37	0.040	1544.42	40.42	0.57
Conexión 36	0.040	1544.44	40.44	0.38
Conexión 35	0.148	1544.76	42.76	0.44
Conexión 34	0.124	1544.85	42.85	0.36
Conexión 33	0.007	1544.86	41.86	0.33
Conexión 32	0.024	1544.90	41.90	0.38
Conexión 23	0.068	1544.98	40.98	0.43
Conexión 22	0.154	1545.17	23.17	0.51
Conexión 13	0.181	1545.82	17.82	0.58
Conexión 04	0.024	1546.28	16.28	0.73
Conexión 03	0.039	1547.41	15.41	0.86
Conexión 02	0.052	1549.42	16.42	1.03
Conexión 52	0.079	1541.74	16.74	0.19
Conexión 51	0.063	1541.75	12.75	0.21
Conexión 49	0.056	1541.78	13.78	0.23
Conexión 47	0.059	1541.87	14.87	0.26
Conexión 45	0.068	1542.09	20.09	0.30
Conexión 43	0.056	1542.63	26.63	0.35
Conexión 41	0.055	1542.85	26.85	0.41
Conexión 38	0.026	1544.16	40.16	0.48
Conexión 39	0.026	1544.16	40.16	0.45
Conexión 40	0.063	1544.16	46.16	0.42
Conexión 50	0.101	1541.76	21.76	0.21
Conexión 48	0.108	1541.85	21.85	0.24
Conexión 46	0.124	1542.06	26.06	0.27
Conexión 44	0.078	1542.62	28.62	0.32
Conexión 42	0.065	1542.85	27.85	0.38
Conexión 11	0.128	1547.79	15.79	0.86
Conexión 16	0.13	1546.95	15.95	0.81
Conexión 15	0.181	1545.93	16.93	0.69

Conexión 19	0.273	1545.10	25.10	0.62
Conexión 10	0.15	1547.39	14.39	0.75
Conexión 12	0.163	1546.75	15.75	0.67
Conexión 14	0.221	1545.89	15.89	0.58
Conexión 21	0.144	1545.18	23.18	0.50
Conexión 20	0.144	1545.10	24.10	0.44
Conexión 05	0.008	1546.10	16.10	0.63
Conexión 06	0.026	1545.94	16.44	0.53
Conexión 25	0.201	1545.05	23.05	0.46
Conexión 24	0.074	1544.98	40.98	0.41
Conexión 31	0.034	1544.98	41.98	0.39
Conexión 07	0.014	1545.88	16.88	0.46
Conexión 08	0.016	1545.75	16.75	0.36
Conexión 09	0.194	1545.36	17.36	0.28
Conexión 26	0.222	1544.34	23.34	0.21
Conexión 27	0.103	1544.44	45.44	0.17
Conexión 28	0.013	1544.44	46.44	0.16
Conexión 29	0.006	1544.54	45.54	0.22
Conexión 30	0.006	1544.71	42.71	0.27
Conexión n67	0.004	1544.54	46.54	0.21

Fuente: El Autor

Anexo b. Tablas de corrección del cloro en los nodos 27, 28 y 52

Tabla de Evolución - Nudo 27				
Tiempo		Demanda	Presión	CLORO
Horas		LPS	m	mg/L
	0:00	0.31	56.27	
	1:00	0.31	56.27	0.21
	2:00	0.41	54.82	0.28
	3:00	0.41	54.82	0.31
	4:00	0.62	50.84	0.31
	5:00	0.82	45.44	0.27
	6:00	1.08	36.71	0.25
	7:00	0.93	42.21	0.24
	8:00	0.82	45.44	0.25
	9:00	0.41	54.82	0.25
	10:00	0.31	56.27	0.32
	11:00	0.31	56.27	0.34
	12:00	0.72	48.32	0.34

13:00	0.77	46.92	0.26
14:00	0.46	53.96	0.26
15:00	0.41	54.82	0.30
16:00	0.31	56.27	0.31
17:00	0.21	57.35	0.34
18:00	0.21	57.35	0.36
19:00	0.10	58.05	0.36
20:00	0.05	58.25	0.39
21:00	0.05	58.25	0.45
22:00	0.05	58.25	0.42
23:00	0.21	57.35	0.43
24:00:00	0.31	56.27	0.34

Tabla de Evolución - Nudo 28				
Tiempo		Demanda	Presión	CLORO
Horas		LPS	m	mg/L
0:00		0.04	57.27	
1:00		0.04	57.27	0.20
2:00		0.05	55.82	0.22
3:00		0.05	55.82	0.30
4:00		0.08	51.84	0.30
5:00		0.10	46.44	0.27
6:00		0.14	37.70	0.24
7:00		0.12	43.21	0.22
8:00		0.10	46.44	0.23
9:00		0.05	55.82	0.24
10:00		0.04	57.27	0.30
11:00		0.04	57.27	0.32
12:00		0.09	49.31	0.32
13:00		0.10	47.92	0.25
14:00		0.06	54.96	0.25
15:00		0.05	55.82	0.29
16:00		0.04	57.27	0.30
17:00		0.03	58.35	0.32
18:00		0.03	58.35	0.35
19:00		0.01	59.05	0.34
20:00		0.01	59.25	0.36
21:00		0.01	59.25	0.35
22:00		0.01	59.25	0.39
23:00		0.03	58.35	0.37
24:00:00		0.04	57.27	0.31

Tabla de Evolución - Nudo 52				
Tiempo		Demanda	Presión	CLORO
Horas		LPS	m	mg/L
	0:00	0.24	29.83	
	1:00	0.24	29.83	0.24
	2:00	0.32	28.07	0.21
	3:00	0.32	28.07	0.29
	4:00	0.47	23.26	0.32
	5:00	0.63	16.74	0.29
	6:00	0.83	6.22	0.27
	7:00	0.71	12.85	0.25
	8:00	0.63	16.74	0.26
	9:00	0.32	28.07	0.27
	10:00	0.24	29.83	0.32
	11:00	0.24	29.83	0.34
	12:00	0.55	20.21	0.34
	13:00	0.59	18.53	0.28
	14:00	0.36	27.03	0.27
	15:00	0.32	28.07	0.31
	16:00	0.24	29.83	0.32
	17:00	0.16	31.14	0.34
	18:00	0.16	31.14	0.37
	19:00	0.08	31.99	0.37
	20:00	0.04	32.23	0.41
	21:00	0.04	32.23	0.42
	22:00	0.04	32.23	0.39
	23:00	0.16	31.14	0.35
	24:00:00	0.24	29.83	0.30

Fuente: El Autor